RADOSLAV KORBAR

PNEUMATIKA I HIDRAULIKA

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC, 2007.

Autor: mr. sc. Radoslav Korbar

Recenzenti: prof. dr. sc. Joško Petrić
prof. dr. sc. Ante Pavić
prof. dr. sc. Branko Staniša

Nakladnik: Veleučilište u Karlovcu

Za nakladnika: prof. dr. sc. Antun Alegro

ISBN 978-953-7343-07-1

SADRŽAJ

PREDGOVOR

Ova skripta sadrže gradivo kolegija "Pneumatika i hidraulika" IV semestra studija Mehatronike Veleučilišta u Karlovcu. Skripta mogu biti od pomoći studentima tehničkih učilišta za pripremu ispita iz područja pneumatike i hidraulike.

Izbor i sistematizacija obrađenih tema uglavnom se podudaraju s temeljnim tečajevima hidraulike i pneumatike. Međutim, program je morao biti prilagođen raspoloživom vremenu i adekvatno ograničen. Zato u skripta nisu uključena područja elektropneumatike, elektrohidraulike i proporcionalne tehnike, unatoč njihovoj aktualnosti i potrebama prakse. Također se sva šarolikost mogućih tehničkih rješenja ne tretira sveobuhvatno. Obrađena su samo tehnička rješenja potrebna za razumijevanje suštinskih problema i principa. Izloženo gradivo predstavlja solidnu bazu za daljnji samostalni rad, usavršavanje i produbljivanje znanja iz pojedinih područja sukladno individualnim potrebama.

Ugodna mi je dužnost zahvaliti kolegama na svim sugestijama i podršci u pripremi i objavi ovih skripata. Osobitu zahvalnost dugujem prof. dr. sc. Jošku Petriću za njegovu nesebičnu i svesrdnu pomoć. Također ću i čitateljima biti zahvalan na eventualnim sugestijama i upozorenjima na pogreške prisutne u tekstu.

Karlovac, lipanj 2007. Autor

1 UVOD

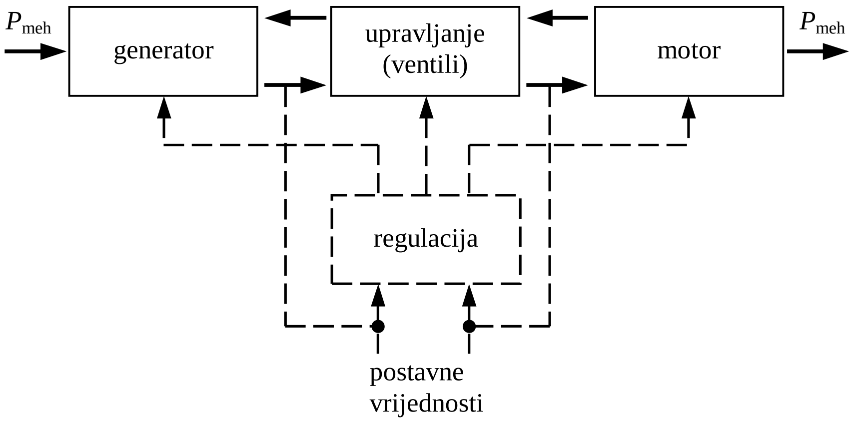
Pneumatika i hidraulika često se nazivaju zajedničkim imenom fluidika. Fluidika se bavi sustavima za prijenos energije i/ili signala putem radnog fluida. Zadaci pneumatskog ili hidrauličkog sustava mogu uključivati pretvorbu, prijenos i upravljanje energijom.

Pneumatika kao radni medij koristi stlačivi fluid – plin, najčešće zrak. Hidraulika kao radni fluid koristi nestlačivi fluid – kapljevinu. Najčešće je to hidrauličko ulje, pa se zbog toga susreće i naziv uljna tehnika. Osim ulja koriste se i teško zapaljivi i specijalni fluidi.

Pneumatika i hidraulika imaju važnu ulogu u automatizaciji, posebno kada su u pitanju izvršni elementi. Pneumatski elementi prisutni su danas u velikom broju pogona, najviše se koriste unutar tzv. male automatizacije. Pneumatika je jednostavnija, a rješenja su u većoj mjeri univerzalna i koriste standardizirane elemente, dok su kod hidraulike rješenja u većoj mjeri specifična, pa zahtijevaju više iskustva i znanja. U širem smislu hidraulika ili tehnička hidromehanika bavi se tehničkom primjenom kapljevina, što uključuje i probleme navodnjavanja, opskrbu vodom, brane itd.

Hidraulički sustavi imaju najpovoljniji omjer snage po jedinici mase. Također su radni tlakovi visoki tako da se hidraulički sustavi tipično koriste u slučajevima kada je potrebna velika snaga i/ili velika sila. Nestlačivi medij hidrauličkih sustava omogućava precizno pozicioniranje izvršnih elemenata, dok kod pneumatskih sustava to nije slučaj. Velika prednost pneumatskih sustava je nezapaljivost radnog medija, pa se često koriste kada je potrebna visoka sigurnost pogona.

Struktura i funkcija fluidičkih prijenosa. U fluidičkim prijenosnim sustavima povezani su generatori (pumpe ili kompresori), fluidički motori i upravljački elementi u kružni tok u kojem radni fluid cirkulira prenoseći energiju (*Sl. 1.1*).



Sl. 1.1 Struktura fluidičkog prijenosa

Zbog visokih se tlakova kao generator koristi samo volumetrički tip pumpe odn. kompresora. Zbog toga i zbog nestlačivosti hidrauličkih fluida, prijenos hidrauličkog pogona približno je nezavisan o opterećenju (između pogonske jedinice – pumpe i pokretačke jedinice – motora postoji volumenska povezanost). Nasuprot tome, stlačivost plina kao radnog medija pneumatskih sustava je znatna, pa se pogonska i pokretačka jedinica ponašaju kao da su priključene na mrežu.

Transport radnog fluida odvija se putem vodova, što omogućava slobodu u razmještaju pogonske jedinice, upravljačkih sklopova i motora. Ekonomski su kod hidrauličkih sustava prihvatljive udaljenosti do 30 m, a kod pneumatskih do 150 m.

Cilj upravljanja je prekapčanje i prilagođavanje sukladno radnom procesu i uvjetima, kao i ograničenje opterećenja sustava. Upravljanje djeluje na tok fluida (prekapčanje putova fluida, promjena smjera strujanja, grananje – odvajanje dijela fluida) ili mijenja geometriju generatora ili motora. Djeluje uvjetovano (npr. upravljanje prema tlaku, položaju) ili bezuvjetno. Na isti način aktiviraju se i sami upravljački elementi. Aktiviranje upravljačkih elemenata vrši se neposredno ili posredno. To pruža veliku mogućnost daljinskog i/ili automatskog upravljanja, naročito u kombinaciji s elektroničkim upravljačkim elementima. Pneumatski sustavi često se kombiniraju s hidrauličkim (za velike sile) i/ili električnim (za prijenos i obradu signala).

Prijenos energije putem radnog fluida pruža gotovo neograničenu mogućnost pretvorbe faktora koji određuju snagu (sila i moment odn. brzina i kutna brzina). Zavisno od snage i vanjskih uvjeta postoji niz klasifikacija fluidičkih sustava.

Prema **razini snage** fluidički sustavi dijele se u dvije grupe

– Sustavi za prijenos snage
  Ulazna energija dovodi se na mjesto primjene i vrši se njena pretvorba kako bi se ostvarile željene sile/momenti uz potrebnu brzinu/kutnu brzinu. Zbog velike snage potreban je visok stupanj korisnog djelovanja.

– Izvršni (servo) prigoni
  Moraju na mjestu primjene precizno izvršiti upravljačke i regulacijske naredbe. Ovdje je bitna točnost prijenosa informacije (signala), a stupanj korisnog djelovanja može se zanemariti.

Zadatak fluidičkog sustava može biti

– Prijenos snage
  Zadatak je prijenos snage od mjesta proizvodnje do mjesta primjene, a važan je visok stupanj korisnog djelovanja u širokom područje pretvorbe energije. Primjer: pogon vožnje.

– Ostvarivanje sile
  Na mjesto primjene potrebno je dovesti velike sile/momente, a stupanj korisnog djelovanja je manje važan. Primjer: preša, škare.

– Ostvarivanje pomaka
  Zadatak je ostvariti pomak uz visoku točnost pozicije i brzine, često uz relativno malo opterećenje. Stupanj korisnog djelovanja uglavnom nema značaja. Primjer: alatni strojevi, kopirni strojevi.

Način gibanja motora fluidičkih sustava uključuje

– Kružno gibanje
  s beskonačnim kutom zakreta vratila motora

– Zakretno gibanje
  s ograničenim kutom zakreta vratila motora.

– Pravocrtno gibanje

Prema **načinu rada** postoje

– Sustavi s vlastitom energijom
  Njihov zadatak je prijenos sile do mjesta primjene, uz odgovarajuće pojačanje ili raspodjelu sile. Primjer: kočnica automobila.

- Sustavi s vanjskom energijom
  To su pravi fluidički sustavi. Mehanička energija dovodi se izvana i u odgovarajućoj formi prenosi na mjesto primjene. Zadatak posluživanja leži samo u prekapčanju.
- Sustavi s pomoćnom energijom
  Njihov zadatak je analogno pojačanje upravljačke sile korištenjem pomoćne energije. Primjer: regulator turbine, pneumatske kočnice kamiona.

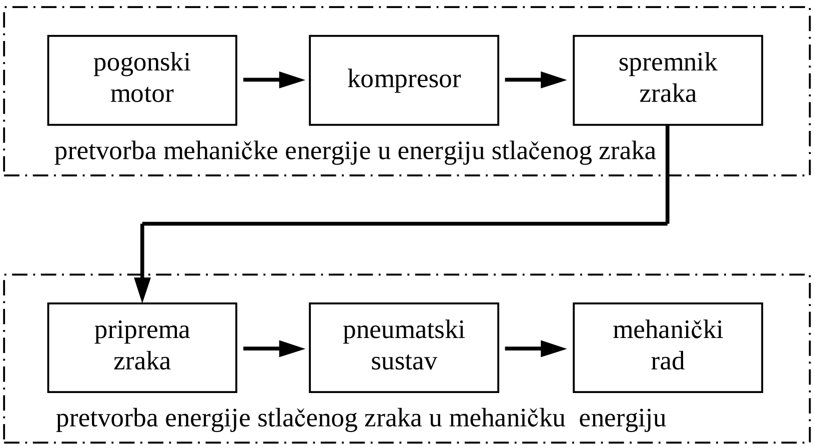
Za prikazivanje fluidičkih sustava koriste se fluidičke sheme koje su normirane. Normiran je način prikazivanja fluidičkih elemenata (normirani simboli) i njihovog povezivanja.

PNEUMATIKA

2 UVOD U PNEUMATIKU

2.1 Karakteristike pneumatskog upravljanja

Zadaci pneumatskog sustava mogu uključivati pretvorbu, prijenos i upravljanje energijom. *Sl. 2.1* shematski prikazuje princip rada pneumatskog sustava. U gornjem bloku prikazana je pretvorba mehaničke energije u energiju stlačenog zraka koji se pohranjuje u spremnik zraka. Kroz pneumatsku razvodnu mrežu taj zrak se dovodi u donji blok, u kojem se vrši obrnuta pretvorba energije. Nakon jedinice za pripremu zraka (čišćenje, sušenje, zauljivanje), u pneumatskom sustavu energija zraka pretvara se u koristan mehanički rad. Taj sustav obuhvaća komponente koje upravljaju smjerom strujanja, protokom i tlakom zraka, kao i komponente koje vrše pretvorbu energije. Osim pretvorbe u mehanički rad, pneumatski sustav često obavlja i ulogu upravljanja odn. regulacije.



Sl. 2.1 Princip rada pneumatskog sustava

Elementi pneumatskog sustava mogu se prema njihovoj funkciji u sustavu podijeliti na:

- elementi za proizvodnju i razvod zraka
- elementi za pripremu zraka
- izvršni elementi
- upravljački elementi
- upravljačko-signalni elementi
- pomoćni elementi

Elementi za **proizvodnju i razvod** zraka imaju zadatak potrošačima osigurati potrebne količine stlačenog zraka odgovarajućih parametara (*kompresor*, *spremnik*, *cjevovodne mreže* za razvod). Elementi za **pripremu** zraka obavljaju pripremu (kondicioniranje) zraka, što uključuje čišćenje, podmazivanje i regulaciju tlaka (*filtar*, *mazalica*, *regulator tlaka*). **Izvršni** elementi su elementi koji obavljaju željene radnje odn. mehanički rad (*cilindri*, *motori*). **Upravljački** elementi (*ventili*) upravljaju tokovima energije i informacija (signala). Upravljanje može biti u potpunosti pneumatsko, a najčešće se izvodi u kombinaciji s drugim medijem i elementima (električko). **Upravljačko-signalni** elementi imaju zadatak dobavljati informacije o

stanju sustava (*senzori, indikatori*). **Pomoćni** elementi ispunjavaju različite dodatne funkcije (npr. priključne ploče, prigušivači buke, brojači itd.)

Kao radni medij stlačeni zrak donosi sljedeće prednosti:

- sirovina (okolni zrak) je uvijek i slobodno **na raspolaganju**,
- relativno jednostavno se **transportira** kroz cijevi,
- može se **skladištiti** i transportirati u spremnicima,
- gotovo je neosjetljiv na promjene **temperature** i ekstremne uvjete,
- neosjetljiv je na **radijaciju**, **magnetska i električka** polja,
- **sigurnost** jer nije eksplozivan niti zapaljiv,
- prilikom ispuštanja **ne zagađuje** okoliš,
- **nema povratnih vodova** (ispuštanje u atmosferu),
- neosjetljivost elemenata na **preopterećenje** (sve do zaustavljanja),
- neosjetljivost elemenata na **vibracije**,
- **trajnost i pouzdanost** robusnih elemenata,
- jednostavna **izvedba** elemenata,
- jednostavno **održavanje** uređaja,
- lako postići željenu i/ili visoku **brzinu** kretanja elemenata,
- brzine i hod mijenjaju se i **podešavaju kontinuirano,**
- promjenom tlaka lako se ostvaruje željena **sila**,
- visok **omjer snage i mase** elemenata,

i nedostatke uzrokovane svojstvima plinovitog medija (**stlačivost** itd.):

- ostvarive su relativno **male sile**,
- energija stlačenog zraka ima višu **cijenu** nego kod el. struje ili ulja,
- **buka** prilikom ekspanzije,
- teško ostvariti jednolične **male brzine** elemenata zbog stlačivosti,
- pneumatski **signali** prenose se samo na male udaljenosti zbog otpora.

Zbog ovih nedostataka pneumatski se sustavi često kombiniraju s hidrauličkim (za velike sile) i/ili električnim (za prijenos i obradu signala).

Karakteristike pneumatskih sustava [1]:

- tlak zraka za **napajanje** 1-15 bar (uobičajeno **7 bar**),
- pogonske **temperature** zraka **-10 do 60 ^{0}C** (maks. oko 200 ^{0}C)
- optimalna **brzina strujanja** zraka **40 m/s**,
- gibanje elemenata: **pravocrtno i rotacijsko**,
- **brzina cilindara 1-2 m/s** (maks. oko 10 m/s),
- maks. ostvariva **sila** oko **40 kN**,
- maks. **snaga** oko **30 kW**,

U pneumatskim sustavima se kod temperatura stlačenog zraka manjim od -10 ^{0}C pojavljuju problemi sa zaleđivanjem, dok se kod temperatura većih od 60 ^{0}C pojavljuje problem brtvljenja.

2.2 Fizikalne osnove

2.2.1 Termodinamičke osnove

Termodinamičke relacije za plinove:

$$u = c_v T, \tag{2.1}$$

$$h = u + \frac{p}{\rho} = c_p T \ , \tag{2.2}$$

$p = Z\rho RT$, jednadžba stanja (2.3)

$\frac{p}{\rho^{\kappa}} = const.$, izentropska promjena stanja (2.4)

$\frac{p}{\rho^{n}} = const.$, politropska promjena stanja (2.5)

pri čemu su

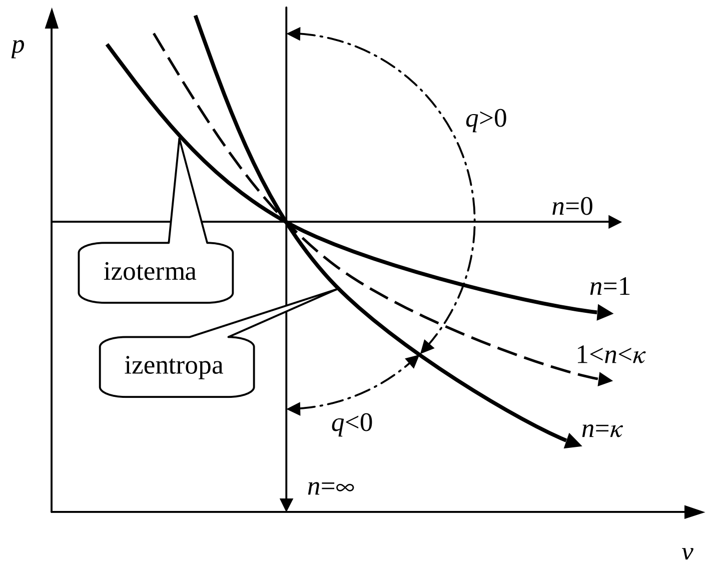
R	plinska konstanta
κ	eksponent izentrope,
n	eksponent politrope (izoterma: n=1, izentropa: n=κ),
c_v, c_p	specifična toplina (pri konst. volumenu, pri konst. tlaku),
Z	faktor stlačivosti (Z=1 za idealni plin),
T	apsolutna temperatura (st. Kelvina),
p	apsolutni tlak,
ρ	gustoća,
u	specifična unutrašnja energija,
h	specifična entalpija

Normalno stanje plina je stanje pri standardnoj temperaturi t = 0 ^{0}C i apsolutnom tlaku p = 1,01325 bar (standardni atmosferski tlak). Pri normalnom stanju suhi zrak ima sljedeća svojstva:

R = 287,1 J/kgK	plinska konstanta,
κ = 1,4	eksponent izentrope,
c_v = 722 J/kgK	specifična toplina zraka (pri konst. volumenu),
c_p = 1011 J/kgK	specifična toplina zraka (pri konst. volumenu),
ρ = 1,293 kg/m^3	gustoća,
μ = 17,5$\cdot$10^{-6} kg/ms	dinamička viskoznost.

Sl. 2.2 prikazuje promjene stanja plina u p-v dijagramu (v = 1/ρ specifični volumen). Eksponent politrope n=∞ odgovara promjeni stanja plina pri konstantnom tlaku (izobara), a n=0 pri konstantnom volumenu (izohora). Ako se promjena stanja odvija u smjeru naznačenom strelicom, u području q>0 toplina se plinu dovodi iz okoline, a u području q<0 odvodi. Pri promjeni stanja u suprotnom smjeru mijenja se i smjer odvođenja/dovođenja topline. Granična promjena je adijabatska (bez izmjene topline s okolinom) koja se u principu poklapa s izentropskom promjenom.

Apsolutni i manometarski tlak. *Apsolutni tlak p* je normalno naprezanje kojem su podvrgnuta plinovita i kapljevita tijela (fluidi) uslijed mehaničkog djelovanja čestica tih tijela (sudaranje molekula). Ovom naprezanju podvrgnute su i sve čvrste površine uronjene u fluid:



Sl. 2.2 Prikaz promjene stanja plina u p-v dijagramu

$p = F/S$

F – pritisak (sila kojom fluid djeluje na uronjenu površinu)

S – površina

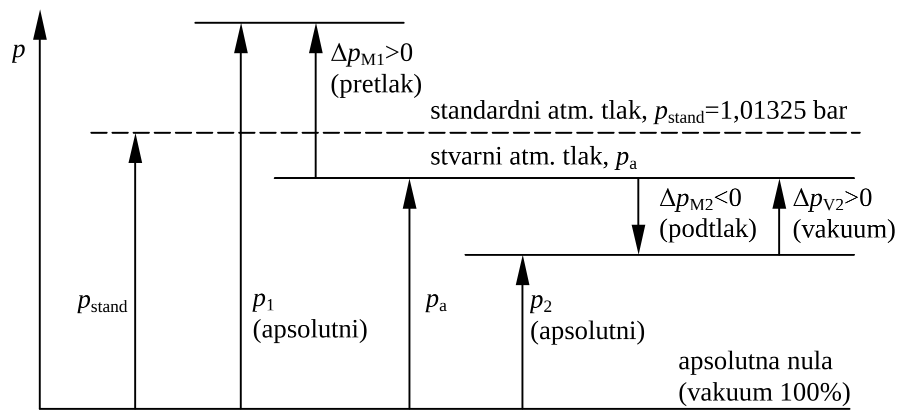
Atmosferski (barometarski) *tlak* p_a je apsolutni tlak okolnog atmosferskog zraka koji zavisi od geodetske visine i meteoroloških uvjeta.

Manometarski tlak Δp_M dobije se tako da se od vrijednosti apsolutnog tlaka p u nekom fluidu računski oduzme vrijednost atmosferskog tlaka p_a

$\Delta p_M = p - p_a$

ili očitavanjem odgovarajućeg manometra. (Manometar je instrument za mjerenje tlaka koji u suštini mjeri razliku tlaka između dva fluida – u ovom slučaju između mjerenog fluida i okolnog atmosferskog zraka).

U slučaju $p > p_a$ dobiva se pozitivna vrijednost manometarskog tlaka ($\Delta p_M>0$) koji se tada naziva *pretlak* (*Sl. 2.3*). Ako je $p < p_a$, manometarski tlak poprima negativnu vrijednost ($\Delta p_M<0$) i tada se naziva *podtlak*. Apsolutna vrijednost podtlaka naziva se *vakuum* Δp_V ($\Delta p_V = -p_M > 0$) i često se izražava u postocima atmosferskog tlaka ($\Delta p_{V\%} = -\Delta p_M/p_a \bullet 100\%$).



Sl. 2.3, Objašnjenje pretlaka, podtlaka i vakuuma

Treba naročito naglasiti da je u pneumatici i hidraulici uobičajeno koristiti **naziv tlak i oznaku *p* za pretlak**, pa će se i ovdje u daljnjem tekstu tako postupati. Zato je pri računanju s tlakom uvijek potreban izvjestan oprez. U termodinamičkim relacijama pojavljuje se gotovo isključivo apsolutni tlak. Kod određivanja sile tlaka na površinu mjerodavna je razlika tlaka na obje strane te površine. Zato se može koristiti pretlak, a to je i pogodnije ako na jednoj strani površine djeluje atmosferski tlak. U Bernoullijevoj jednadžbi (v. kasnije) tlak se pojavljuje na obje strane jednadžbe, pa jednadžba u istom obliku vrijedi kako za apsolutni tlak, tako i za pretlak.

Rad pneumatskog cilindra. Za vrijeme kretanja klipa pneumatskog cilindra tlak je u cilindru približno konstantan (cilindar je cijelo vrijeme priključen na tlak). Potisna sila takvog klipa zato je također približno konstantna $F = pS = const.$, pri čemu je p tlak (tj. pretlak) napajanja, a S površina klipa. Rad koji klip obavi u jednom hodu dobiva se množenjem ove sile s duljinom hoda L

$$W = pSL = pV, \tag{2.6}$$

pri čemu je $V = SL$ radni volumen cilindra.

2.2.2 Strujanje zraka

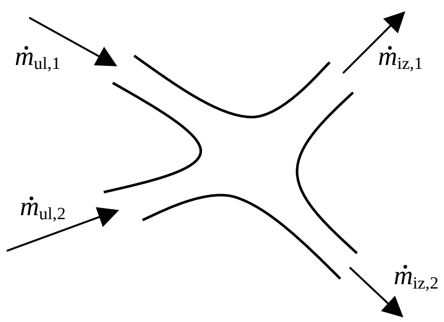
U slučaju kad se strujanje može smatrati stacionarnim, zakoni održanja mase i energije za strujanje zraka u cjevovodnim mrežama pneumatskih sustava poprimaju sljedeće oblike:

Jednadžba kontinuiteta (zakon održanja mase): Maseni protok zraka u cijevi je konstantan

$$\dot{m} = \rho Q = \rho v S = const., \tag{2.7}$$

pri čemu ρ označava gustoću zraka, v brzinu zraka, a S je poprečni presjek cijevi. U cjevovodnim mrežama mora suma svih masenih protoka koji ulaze u čvor cjevovoda (račvu - *Sl. 2.4*) biti jednaka sumi svih masenih protoka koji iz čvora izlaze:

$$\sum \dot{m}_{\mathrm{ul}} = \sum \dot{m}_{\mathrm{iz}} , \tag{2.8}$$

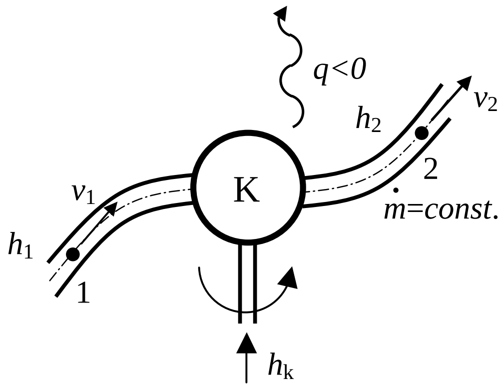


Sl. 2.4 Primjer čvora cjevovoda

Zakon održanja energije (I glavni stavak termodinamike): Zakon održanja energije za strujanje zraka kroz cjevovod odn. dionicu cjevovoda od odabranog ulaznog presjeka 1 do izlaznog presjeka 2 glasi

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} + h_{\mathrm{K}} - h_{\mathrm{M}} + q = h_2 + \frac{v_2^2}{2} , \tag{2.9}$$

pri čemu h označava specifičnu entalpiju zraka, v brzinu strujanja zraka, h_K je prirast entalpije u kompresoru, h_M toplinski pad u pneumatskom motoru, a q je dovedena toplina po kg zraka. Gubici trenja (viskoznosti) ne mijenjaju specifičnu entalpiju h, pa zato nisu eksplicitno vidljivi u ovoj jednadžbi (transformacija mehaničke u unutrašnju energiju).



Sl. 2.5 Primjer uz zakon održanja energije – dionica cjevovoda s kompresorom

Strujanje u pneumatskim cjevovodima često se može smatrati **izotermnim** ($T = const.$). Za idealni ($p = \rho RT$) plin tada vrijedi $u_1 = u_2$, $h_1 = h_2$, $p/\rho = const.$). Iz relacije (*2.9*) tada je npr. očito da povećanje kinetičke energije pri strujanju u cijevi (bez stroja) mora biti jednako toplini dovedenoj izvana.

Obzirom na relativno niske brzine strujanja (niske vrijednosti Machovog broja), u proračunima gubitaka u cjevovodu redovito se zanemaruje promjena gustoće fluida ($\rho = const.$) , tj. koristi se bilanca mehaničke energije za nestlačivi fluid (modificirana Bernoullijeva jednadžba). Uz izvjesna pojednostavljenja, za dionicu cjevovoda u kojoj nije prisutan kompresor niti pneumatski motor ova jednadžba može se od odabranog ulaznog presjeka 1 do izlaznog presjeka 2 zapisati u jednostavnom obliku

$$p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \sum \Delta p_F \, , \qquad (2.10)$$

pri čemu p označava tlak (pretlak) zraka, ρ gustoću zraka, a $\Sigma\Delta p_F$ je zbroj svih linijskih i lokalnih gubitaka tlaka od presjeka 1 do presjeka 2.

Za dionicu cjevovoda duljine L i konstantnog promjera D linijski gubitak tlaka iznosi

$$\Delta p_F = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2} \, , \qquad (2.11)$$

gdje je λ koeficijent viskoznog trenja zraka, a v je brzina strujanja zraka kroz tu dionicu cjevovoda.

Lokalni gubici u nekom elementu armature cjevovoda (npr. ventil, koljeno, ili račva) mogu se procijeniti prema izrazu

$$\Delta p_F = K \rho \frac{v^2}{2} = \lambda \frac{L_e}{D} \rho \frac{v^2}{2} \, , \qquad (2.12)$$

pri čemu je K koeficijent lokalnog gubitka u tom elementu armature. U priručnicima se koeficijent lokalnog gubitka često izražava pomoću ekvivalentne duljine cijevi $L_e = KD/\lambda$.

Kao **idealni rad stroja** (kompresora, motora) uzima se rad pri idealnom izotermnom procesu (*Sl. 2.6*). Kompresor usisava zrak pri (apsolutnom) tlaku p_1 i dobavlja ga pri tlaku p_2. Klip kreće iz donje mrtve točke (DMT) u kojoj volumen cilindra iznosi V_1, pa prelazi hod L do gornje mrtve točke (GMT) u kojoj je volumen u cilindru jednak nuli (štetni prostor $V_0=0$, $V_1=SL$, S je površina klipa). U fazi kompresije tlak (apsolutni) mijenja se po izotermi $pV = p_1V_1 = const.$ (linija 1-2). U točki 2 postiže se dobavni tlak p_2, tlačni ventil se otvara, a tlak u cilindru tijekom daljnjeg tlačenja ostaje konstantan $p=p_2$ (linija 2-3). Rad dW koji klip troši tijekom malog pomaka dx jednak je

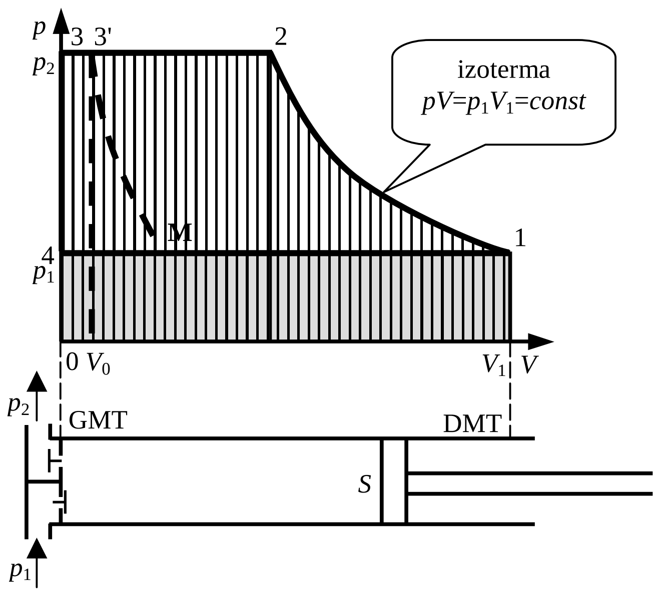
$$dW = pSdx = pdV\,, \tag{2.13}$$

tako da je ukupni rad tlačenja od točke 1 do 3 jednak površini ispod linije 1-2-3.

U fazi usisavanja zrak pod tlakom p_1 gura klip u suprotnom smjeru. Time se obavlja rad koji je jednak površini ispod linije 4-1. Ovaj rad ima suprotan predznak (pozitivni rad), pa ga treba oduzeti od utrošenog rada.

Ukupni utrošeni rad za jedan ciklus i dobavu volumena V_1 zraka (gledano na ulazu kompresora) jednak je dakle površini lika 1-2-3-4-1 i iznosi

$$W = \int_1^2 Vdp = \int_1^2 p_1V_1\frac{dp}{p} = p_1V_1\ln\frac{p_2}{p_1}\;. \tag{2.14}$$



Sl. 2.6 Izotermni rad idealnog kompresora

Volumen usisanog zraka može se zapisati kao $V_1 = m_1/\rho_1$, gdje je m_1 masa zraka dobavljenog u jednom ciklusu. Ako se umjesto te mase uvrsti maseni protok zraka (masa zraka koju kompresor dobavlja u jedinici vremena), dobiva se izraz za teoretsku snagu kompresora

$$P_{\mathrm{KT}} = \dot{m}h_{\mathrm{KT}} = \dot{m}\frac{p_1}{\rho_1}\ln\frac{p_2}{p_1}\,. \tag{2.15}$$

Stupnjem korisnog djelovanja stroja uzimaju se u obzir gubici. Stvarni kompresor ima štetni prostor iznad GMT ($V_0>0$), a dobavljeni volumen umanjuje se za iznos V_0.

Idealni izotermni rad koji se pri tome troši u jednom ciklusu odgovara površini lika 1-2-3'-M-1 (*Sl. 2.6*). Daljnji uzroci gubitaka leže u razlici tlaka potrebnoj za otvaranje ventila, izmjeni topline između plina i stjenki, propuštanju zraka kroz brtvene površine, te trenju mehaničkih dijelova (mehanički gubici).

Stupanj korisnog djelovanja η povezuje idealnu i efektivnu (na spojci) snagu kompresora i iznosi

$$\eta = \eta_m \eta_i \,, \tag{2.16}$$

pri čemu je s η_m označen mehanički (vanjski) stupanj korisnog djelovanja, a s η_i indicirani (unutrašnji) stupanj korisnog djelovanja. Stupanj korisnog djelovanja kompresora iznosi $\eta = 20\div30\%$ [2], motora $\eta = 60\div70\%$, a mehanički stupanj djelovanja $\eta_m = 88\div98\%$. Ako se pretpostavi da energija mehaničkih (vanjskih) gubitaka ne ulazi u radni fluid, snaga kompresora (efektivna) može se zapisati kao

$$P_K = \frac{1}{\eta_m}\dot{m}h_K = \frac{1}{\eta}\dot{m}\frac{p_1}{\rho_1}\ln\frac{p_2}{p_1}\,, \tag{2.17}$$

a snaga motora:

$$P_M = \eta_m \dot{m} h_M = -\eta\dot{m}\frac{p_1}{\rho_1}\ln\frac{p_2}{p_1} = \eta\dot{m}\frac{p_1}{\rho_1}\ln\frac{p_1}{p_2}\,. \tag{2.18}$$

2.2.3 Vlažnost zraka

Mješavina suhog zraka i vode (pare i kapljevine) naziva se *vlažni zrak* (vlažni uzduh). Termodinamička svojstva suhog zraka uglavnom određuju plinovi dušik i kisik sadržani u zraku, dok se sadržaj i utjecaj preostalih suhih plinova u zraku najčešće može zanemariti. Vlažni zrak promatra se kao mješavina samo dviju *komponenti* – suhog zraka (z) i vodene pare (p).

Ako se zamisli da se odstrani suhi zrak iz nekog zatvorenog volumena ispunjenog vlažnim zrakom pod apsolutnim tlakom p, preostala para raširila bi se po cijelom volumenu i poprimila (manji) tlak koji se naziva *parcijalni tlak* pare p_p. Za apsolutni tlak vlažnog zraka (ukupni) p vrijedi

$$p = p_z + p_p \,, \tag{2.19}$$

pri čemu je s p_z označen parcijalni tlak suhog zraka.

Ako tlak vlažnog zraka iznosi oko 1 bar, za njegove komponente dovoljno točno vrijedi jednadžba stanja idealnog plina. Tako za suhi zrak vrijedi jednadžba

$$p_z V = m_z R_z T \,, \tag{2.20}$$

a za paru u zraku

$$p_p V = m_p R_p T \,, \tag{2.21}$$

pri čemu su

V – volumen vlažnog zraka (ukupni), m^3/h
T – temperatura vlažnog zraka, K
m_z, m_p – masa suhog zraka odn. pare, kg
R_z, R_p – plinska konstanta za suhi zrak odn. paru, J/kgK

Najveća moguća vrijednost parcijalnog tlaka vodene pare jednaka je tlaku zasićenja (isparavanja) vodene pare p' ($p_{p,maks} = p'$) koji zavisi samo od temperature (temperatura zasićenja tj. vrelište), v. tablicu.

Vlažnost zraka x (apsolutna vlažnost) definira sadržaj vode (pare i kapljevine) u vlažnom zraku, a predstavlja omjer mase vode i *mase suhog zraka*

$x = m_v/m_z$, (2.22)

m_z, m_v – masa suhog zraka odn. vode ($m_v = m_p + m_k$), kg

Ukupna masa vlažnog zraka prema tome iznosi

$m = m_v + m_z = m_z(1+x)$ (2.23)

Granične slučajeve predstavljaju suhi zrak ($m_v = 0$, $x = 0$) i čista voda ($m_z = 0$, $x = \infty$). Zrak koji ne sadrži kapljevitu vodu ($m_k = 0$, sadrži vodu samo u formi pare $m_v = m_p$) naziva se *nezasićeni vlažni zrak* ako je parcijalni tlak vodene pare manji od tlaka zasićenja pri danoj temperaturi ($p_p < p'$), odn. *zasićeni vlažni zrak* kad vrijedi $p_p = p_{p,maks} = p'$. Za nezasićeni i za zasićeni zrak može se vlažnost $x = x_p$ odrediti prema izrazu

$$x_p = \frac{m_p}{m_z} = \frac{R_z}{R_p} \cdot \frac{p_p}{p_z} = 0,622 \frac{p_p}{p_z} \qquad (2.24)$$

Tablica 2.1 Tlak zasićenja p' vodene pare u zavisnosti od temperature t

t, ^{0}C	p, bar	t, ^{0}C	p, bar	t, ^{0}C	p, bar	t, ^{0}C	p, bar
0	0,006108	30	0,04241	60	0,1992	155	5,433
2	0,007055	32	0,04753	70	0,3116	160	6,181
4	0,008129	34	0,05318	80	0,4736	165	7,008
6	0,009345	36	0,05940	90	0,7011	170	7,920
8	0,010720	38	0,06624	100	1,0133	180	10,027
10	0,012270	40	0,07375	105	1,2080	190	12,551
12	0,014014	42	0,08198	110	1,4327	200	15,549
14	0,015973	44	0,09100	115	1,6906	210	19,077
16	0,018168	46	0,10086	120	1,9854	220	23,198
18	0,02062	48	0,11162	125	2,3210	250	39,776
20	0,02337	50	0,12335	130	2,7013	300	85,927
22	0,02642	52	0,13613	135	3,131	325	120,560
24	0,02982	54	0,15002	140	3,614	350	165,350
26	0,03360	56	0,16511	145	4,155	374,15	221,200
28	0,03778	58	0,18147	150	4,760		

Zasićeni zrak sadrži najveću moguću masu vodene pare ($m_p = m_{p,maks}$). Vlažnost zasićenog zraka označit će se oznakom x' ($x = x_{p,maks} = x'$). Zrak koji sadrži kapljice i/ili kristale vode naziva se *prezasićeni zrak* (*magla, susnježna magla i ledena magla*). U tehničkim problemima plinoviti dio prezasićenog zraka (samo zrak i para) uvijek je zasićen ($x = x_p + x_k > x_p = x'$, $x_k = m_k/m_z$), tj. sadrži maksimalnu moguću količinu pare.

Relativna vlažnost zraka φ definirana je izrazom

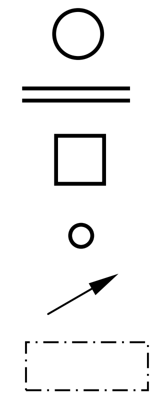
$\varphi = m_p/m_{p,maks} = p_p/p'$ (2.25)

tako da φ može poprimiti vrijednosti od 0 do 1 (odn. 0-100%). Relativna vlažnost povećava se *povećanjem tlaka* ili *smanjenjem temperature* zraka. Smanjenjem temperature ili povećanjem tlaka pri φ=1 (zasićeni vlažni zrak) dolazi do kondenzacije onog dijela vlage u zraku koji premašuje najveću moguću količinu, tako da se relativna vlažnost ne mijenja (ostaje φ=1). Kondenzirana voda u obliku magle može se odgovarajućim postupcima izdvojiti. Očito, ovo izdvajanje vode (sušenje odn. smanjivanje vlažnosti x zraka) najuspješnije se može obaviti hlađenjem zraka (smanjenje temperature) neposredno iza kompresora (najviši tlak). Ovdje treba postići najnižu temperaturu zraka u cijelom pneumatskom sustavu, čime se osigurava da nigdje u sustavu neće doći do kondenzacije vode.

2.3 Simboli i sheme

Pneumatski sklopovi i sustavi grafički se predočuju pomoću pneumatskih shema. Način crtanja shema i simboli kojima se predočuju pojedini pneumatski elementi propisani su normom DIN/ISO 1219. Niže su dana neka opća objašnjenja i pravila za crtanje simbola i shema.

Osnovni detalji simbola:



vod (cijev za zrak)

mimoilaženje vodova

spoj vodova (račva)

regulacijski (signalni) vod

rotacijski stroj (kompresor, pumpa, motor)

vratilo, osovina dio mehanizma

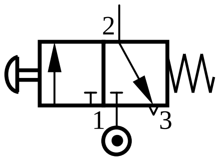
ventil, izmjenjivač ili sl.

zglob na poluzi ili kotačić na ticalu

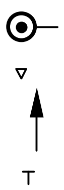
mogućnost podešavanja

sklop od više elemenata

Detalji vezani uz simbol razvodnika (npr. razvodnik 3/2 – poput prekidača u elektrotehnici):



– priključci i razvod



napajanje (stlačeni zrak)

odzračivanje (atmosfera)

otvoren prolaz s naznačenim smjerom strujanja

zatvoren prolaz

Priključci se ucrtavaju na kvadrat koji prikazuje normalni (neaktivirani) položaj razvodnika (u ovom slučaju položaj pod djelovanjem opruge). Ostali kvadrati prikazuju aktivirane položaje razvodnika (u ovom slučaju položaj s pritisnutim tasterom).

– oznake priključaka:

Priključci se označavaju brojevima sukladno normi DIN/ISO 559. Ranija norma predviđala je označavanje slovima. Tablica donosi značenje oba ova načina označavanja.

Tablica 2.2 [3]

Usporedna tablica označavanja priključaka		
Priključak	Označavanje brojevima DIN/ISO 559	Označavanje slovima (staro)
napajanje	1	P
odzračivanje	3, 5, 7	R, S, T
izlazi (radni vodovi)	2, 4, 6	A, B, C
upravljački priključci		X, Y, Z
- spoj 1 sa 2	12	
- spoj 1 sa 4	14	
zatvaranje dovoda zraka	10	
pomoćni upravljački zrak	81, 91	Pz

– razvodnike se može aktivirati

fizički – npr. simbol ˝tipkalo˝: 

mehanički – npr. simbol ˝opruga˝: 

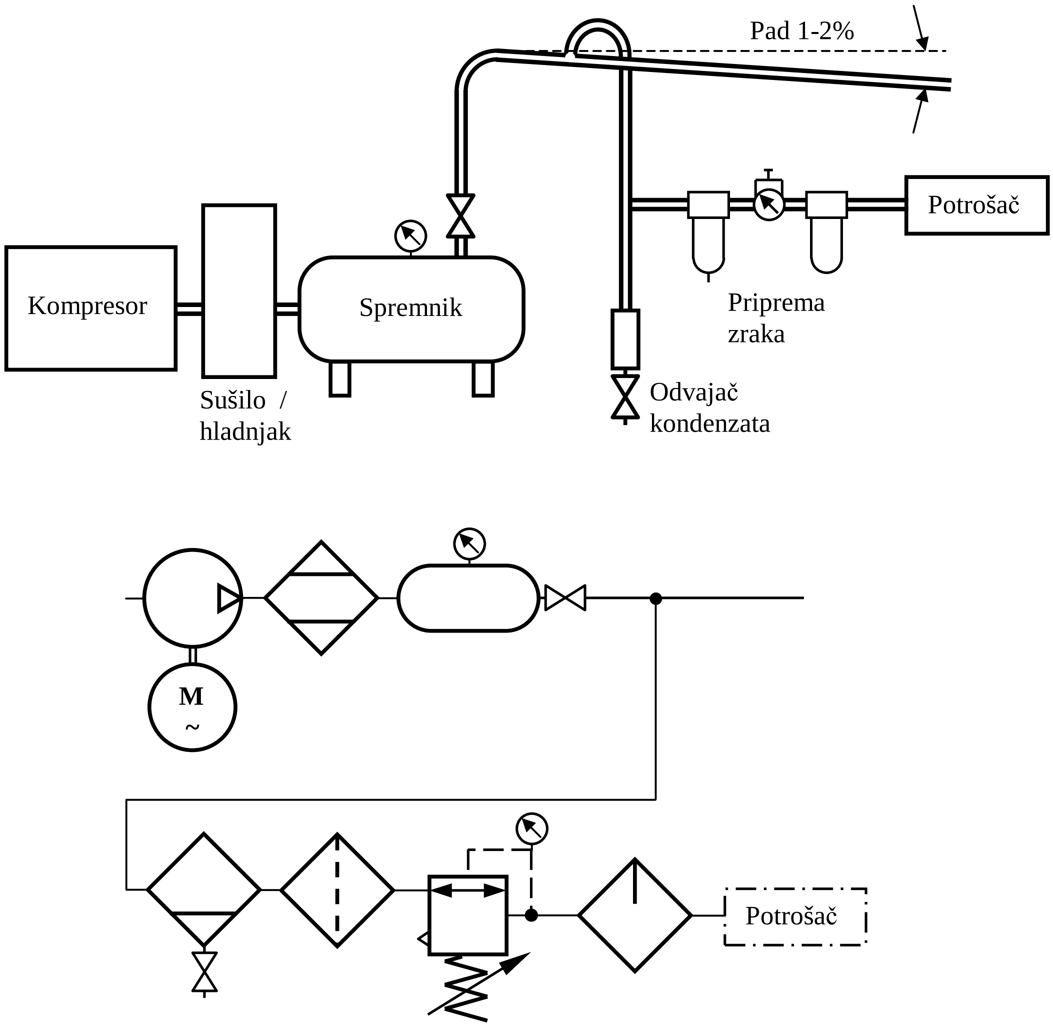
tlačno – npr. simbol ˝izravno tlačno˝:

električki – npr. simbol ˝elektromagnet˝: 

3 DOBIVANJE I PRIPREMA ZRAKA

3.1 Dobivanje i razvod zraka

Sl. 3.1 prikazuje shemu napajanja i razvod pneumatskog sustava. Grupa za pripremu zraka sadrži filtar, regulacijski ventil i eventualno mazalicu. Glavni vod postavlja se s padom od 1-2% u smjeru strujanja zraka, kako bi se osiguralo otjecanje kondenzirane vode. Glavni vod treba osigurati ujednačeni tlak bez obzira na potrošnju zraka.



Sl. 3.1 Skica i shema napajanja i razvodne mreže [1]

Potrošnja zraka, *Q* – mjerodavna za dimenzioniranje sustava

$Q = k_i \Sigma Q_i + Q_G$ najčešće u m^3/min, (3.1)

*Q*i – potrošnja zraka i-tog pneumatskog elementa u njegovom trajnom radu (iz kataloga)

k_i – koeficijent istodobnosti – zavisi od vrste pneumatskog uređaja, komponenata itd. (iz dijagrama – teško ga je pouzdano odrediti)

Q_G – gubici uslijed propusnosti (15-30%)

3.1.1 Kompresori

U *kompresorima* se vrši pretvorba mehaničke energije u energiju stlačenog zraka, dok se u *pneumatskim motorima* obavlja transformacija energije u suprotnom smjeru. Kompresori i pneumatski motori principijelno se bitno ne razlikuju a konstrukcijski se razlikuju samo u detaljima. Ako se npr. punjenje i pražnjenje cilindra klipnog motora ili kompresora vrši preko usisnih i ispušnih ventila, motor mora imati mehanizam za prisilno otvaranje/zatvaranje ventila (bregasto vratilo), dok je kod kompresora moguće samoradno pokretanje ventila (pomoću samog tlaka zraka u cilindru). Često isti stroj može raditi kao kompresor ili motor, zavisno od ugradnje odn. povezivanja u sustav.

Osnovna podjela kompresora je podjela na *volumetričke kompresore i turbokompresore*. U pneumatici se gotovo isključivo koriste volumetrički kompresori. Njihov princip rada bazira se na radnoj komori promjenljivog obujma (npr. cilindar s klipom). Smanjenjem obujma radne komore smanjuje se i volumen zraka u njoj, što uzrokuje odgovarajući prirast tlaka zraka.

Podjela volumetričkih kompresora:

- Klipni kompresori
  mehanizam: koljeničasti / radijalni / aksijalni / kulisni
  jednostupanjski / višestupanjski
  jednoradni / dvoradni
  vertikalni / horizontalni
  mobilni / stacionarni – za veće kapacitete
- Rotacijski kompresori
  krilni
  vijčani
  zupčasti
- Membranski kompresori

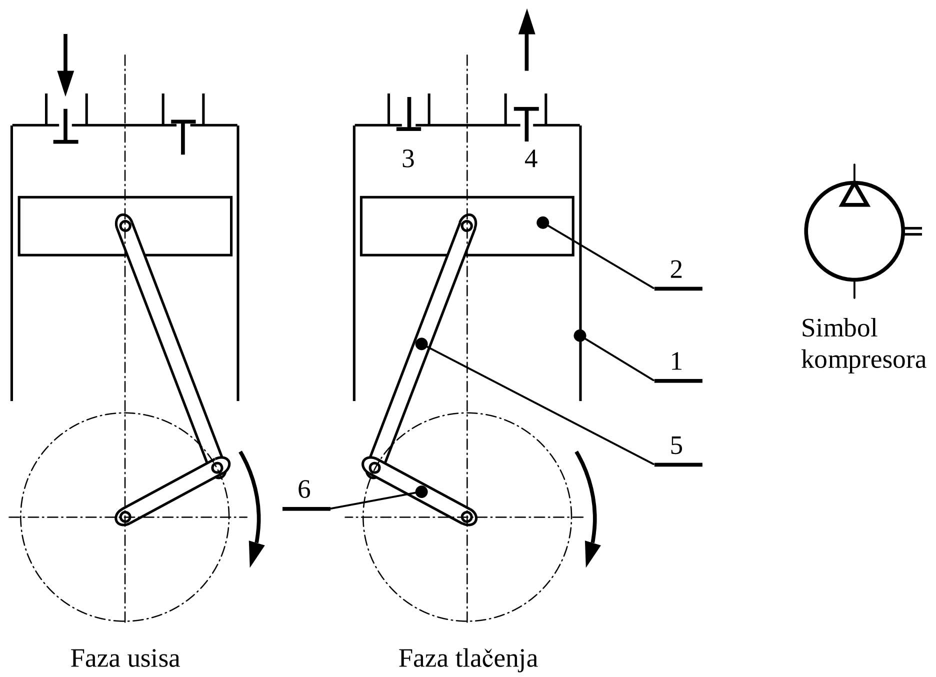
Turbokompresori se dijele na *radijalne* i *aksijalne* turbokompresore. Općenito radijalni turbokompresori postižu *veći tlak i manji protok* nego aksijalni.

Cilindar jednoradnog *klipnog kompresora* puni se i prazni samo s jedne strane klipa. Pri hodu klipa prema dolje (*Sl. 3.2*) cilindar se puni kroz usisni ventil (faza usisa), dok se pri kretanju u suprotnom smjeru zrak tlači kroz tlačni ventil (faza tlačenja). Na slici je prikazan kompresor kod kojeg se pretvaranje pravocrtnog gibanja klipa pretvara u kružno gibanje pomoću mehanizma s koljeničastim vratilom. Dvoradni cilindri usisavaju i tlače zrak s obje strane klipa.

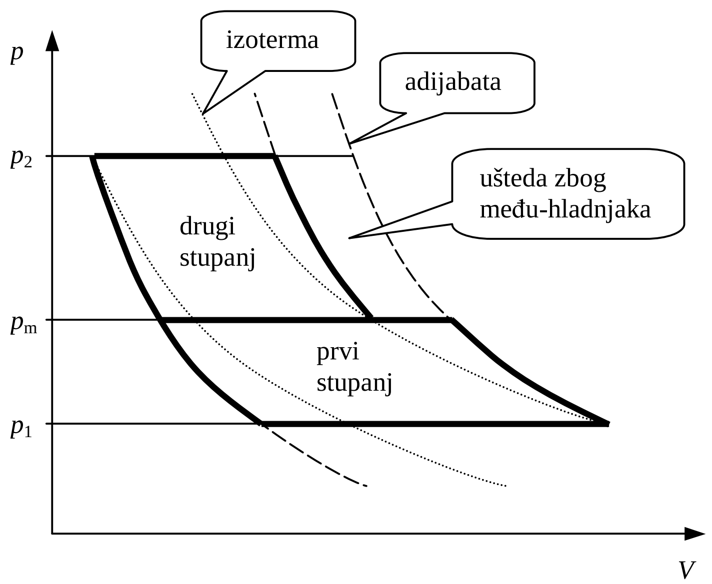
U višestupanjskim kompresorima zrak se uzastopno tlači u većem broju cilindara kroz koje prolazi (serijski spoj). Jednostupanjski kompresori koriste se za povećanje tlaka do 4 bar, dvostupanjski – do 15 bar [3], a višestupanjski za veće tlakove. Zbog mogućnosti zapaljenja kompresorskog ulja, izlazna temperatura zraka ne smije prelaziti 200 ^{0}C. Kao volumenski protok kompresora obično se uzima njegov ulazni protok ($Q_K = Q_1$, $m' = \rho_1 Q_1 = const.$).

Sl. 3.3 prikazuje kružni proces idealnog dvostupanjskog kompresora s među-hladnjakom u *p-v* dijagramu. Rad jednog ciklusa (usisavanje i tlačenje) za prvi stupanj jednak je površini donjeg kružnog procesa. Promjena stanja zraka u kompresorskom stupnju obično je bliska adijabatskoj. Rad potreban za adijabatsku kompresiju veći je od rada izotermne kompresije. Ugradnjom među-hladnjaka između stupnjeva kompresora smanjuje se ukupni potrebni rad kompresora (ukupni proces približava se

izotermnom). Povoljno je i smanjenje temperature na izlazu kompresora (izlazu drugog stupnja).

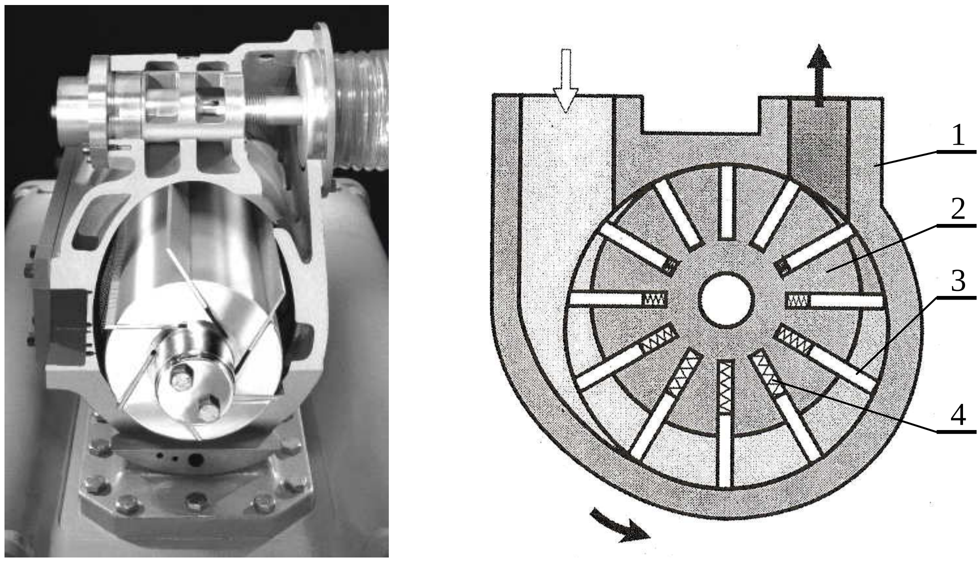


Sl. 3.2 Princip rada klipnog kompresora: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – usisni ventil, 4 – tlačni ventil, 5 – ojnica , 6 – koljeničasto vratilo



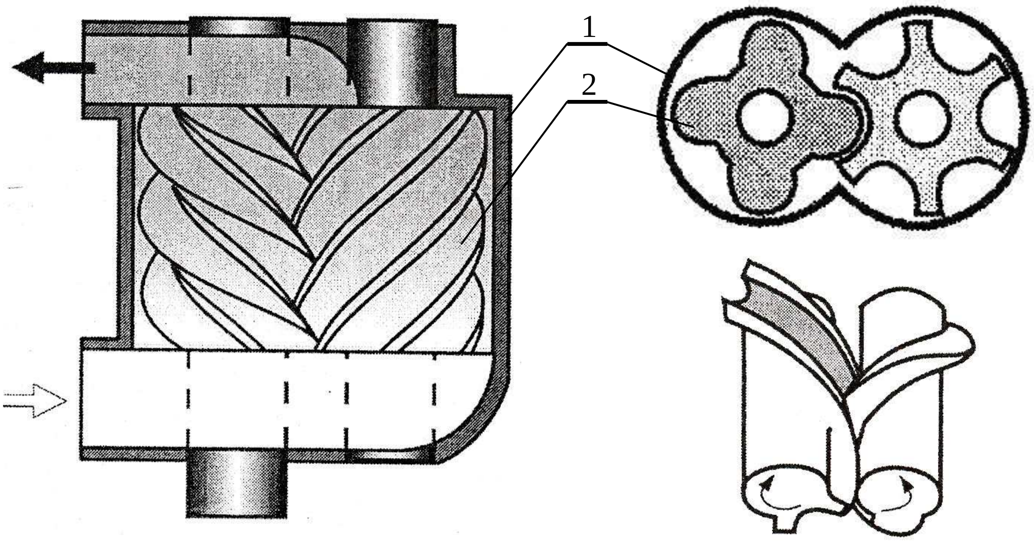
Sl. 3.3 Prikaz idealnog procesa dvostupanjskog kompresora s među-hladnjakom u p-V dijagramu

Kod *krilnih kompresora* (*Sl. 3.4*) zrak zarobljenu u volumenu između krila, statora i rotora tlači se smanjenjem tog volumena prilikom rotacije rotora postavljenog ekscentrično u odnosu na os statora. Promjenom ekscentriciteta moguće je regulirati protok.



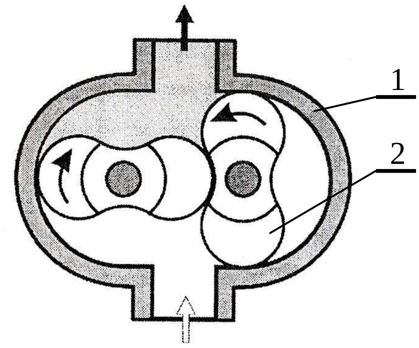
Sl. 3.4 Slika i skica krilnog kompresora - Pneumofore [4], [3]*: 1 – stator, 2 – ekscentrično postavljen rotor, 3 – krilo (lamela), 4 - opruga*

Vijčani kompresori (*Sl. 3.5*) nešto su skuplji i imaju lošiji stupanj korisnog djelovanja, a prednost im je dugi vijek trajanja i mali troškovi održavanja. Tlačni mehanizam je spregnuti vijčani par koji se okreće u međusobno suprotnim smjerovima. Radne komore stvaraju se između vijaka i statora. Zrak se kontinuirano usisava na jednoj strani vijka (komore se otvaraju) i tlači na suprotnoj strani (komore nestaju).



Sl. 3.5 Skica vijčanog kompresora [3]*: 1 – stator, 2 – rotor (vijak)*

Zupčasti kompresori (*Sl. 3.6*) imaju sličan princip rada kao i vijčani. Radni mehanizam je jedan par zupčanika koji su u zahvatu, pa se okreću u međusobno suprotnim smjerovima. I ovdje se radne komore stvaraju između rotora i statora, na strani na kojoj zubi izlaze iz zahvata otvara se i puni uvijek nova radna komora (usis), a na suprotnoj strani, ulaskom zuba u zahvat, komora nestaje.

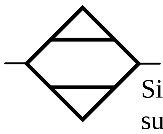


Sl. 3.6 Skica zupčastog (root) kompresora [3]*: 1 – stator, 2 – rotor (zupčanik s 2 zuba)*

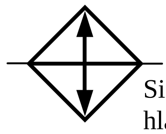
3.1.2 Sušenje / hlađenje

U pneumatskim upravljačkim i izvršnim elementima ne smije se dopustiti kondenzacija vlage iz zraka. Zato se suvišna vlaga mora izdvojiti, a to se vrši na izlazu kompresora. Postupci sušenja su:

- kemijski ili apsorpcijski
- fizikalni ili adsorpcijski
- termički ili postupak pothlađivanja



Simbol sušila



Simbol hladnjaka

U *kemijskom postupku* zrak se provodi kroz sloj higroskopne tvari (npr. magnezijev perklorat, litijev klorid, kalcijev klorid). Vlaga se zadržava u tom sloju, cijedi se, sakuplja i odvaja na dnu sloja. Kemikalija se pomalo troši, pa se mora nadoknađivati.

U *fizikalnom postupku* zrak se provodi kroz usitnjeni silicijev dioksid (silikagel) ili aluminijev oksid. Ova materija se zasićuje vodom, zato se apsorberi ugrađuju u paru. Dok je jedan od njih u funkciji, drugi se regenerira toplim zrakom.

Termički postupak ujedno smanjuje previsoku temperaturu zraka na izlazu iz kompresora (hlađenje). Ako se želi osigurati da se prilikom ekspanzije (smanjenje temperature) u pneumatskim uređajima neće kondenzirati voda, potrebno je izvršiti pothlađivanje zraka iz kompresora na temperaturu +1,5 ^{0}C (niža temperatura dovela bi do zaleđivanja vode). Zbog uštede energije, nakon izdvajanja kondenzirane vode, pothlađeni zrak koristi se u izmjenjivaču topline (pred-hladnjaku) za pred-hlađenje zraka iz kompresora. Time se pothlađeni zrak zagrijava na neku prihvatljivu temperaturu.

3.1.3 Tlačna posuda (spremnik)

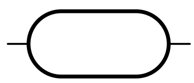
Svrha

- smirivanje tlačnih udara klipnog kompresora (ujednačavanje tlaka)
- kvalitetnija usklađivanje rada kompresora i potrošnje
- preuzimanje vršne potrošnje
- izdvajanje vode i kompresorskog ulja iz stlačenog zraka

Npr. u prehrambenoj industriji zahtijeva se čisti zrak (suhoradni kompresor – npr. membranski ili krilni s teflonskim lamelama).

Svaka tlačna posuda mora imati:

- priključak za dovod stlačenog zraka
- priključak za odvod stlačenog zraka
- priključak za regulator kompresora



Simbol spremnika

– ventil za ograničenje tlaka (sigurnosni) koji se otvara pri tlaku 10% većem od radnog
– manometar
– slavinu za ispuštanje kondenzata ili automatski odvajač kondenzata
– otvor za ljude (za čišćenje)
– zaporni ventil prema mreži
– tlačni prekidač

Tlačne posude volumena većeg od 10 *l* podliježu propisima za posude pod tlakom i moraju imati atest.

Prema iskustvu, za ublažavanje tlačnih udara kompresora dovoljan je volumen posude koji je 20 do 50 puta veći od ukupnog radnog volumena posljednjeg stupnja kompresora. Redovito se odabire kompresor čiji kapacitet Q_{K} je veći od nominalnog protoka sustava Q. Kad takav kompresor spojen na spremnik uključuje intermitentno (on/off regulacija), najčešće se dozvoljava najviše 15 uključivanja i isključivanja kompresora na sat. Ako vrijeme jednog ciklusa uključivanja τ obuhvaća jedan uzastopni period rada τ_1 i mirovanja τ_2 kompresora, tj.

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \ , \tag{3.2}$$

za vrijeme τ1 od uključivanja kompresora pri minimalnom tlaku p' do isključivanja pri maksimalnom tlaku p" u posudu uđe masa Δm zraka, sukladno jednadžbi kontinuiteta u obliku

$$\frac{\Delta m}{\tau_1} = \dot{m}_{\mathrm{K}} - \dot{m} \ , \tag{3.3}$$

dok za vrijeme mirovanja kompresora τ_2 vrijedi

$$\frac{\Delta m}{\tau_2} = \dot{m} \ . \tag{3.4}$$

Kombinacijom ovih izraza dobiva se

$$\Delta m = \dot{m}\tau \left(1 - \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\mathrm{K}}} \right) \ , \tag{3.5}$$

pa kad se još uzme u obzir relacija

$$\Delta m = m'' - m' = \frac{p'' V_{\mathrm{S}}}{R T_{\mathrm{S}}} - \frac{p' V_{\mathrm{S}}}{R T_{\mathrm{S}}} = \Delta p \frac{V_{\mathrm{S}}}{R T_{\mathrm{S}}} \ , \tag{3.6}$$

slijedi konačni izraz

$$V_{\mathrm{S}} = \frac{\dot{m} R T_{\mathrm{S}} \tau}{\Delta p} \left(1 - \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\mathrm{K}}} \right) = \mathrm{Q} \tau \frac{p_1}{\Delta p} \frac{T_{\mathrm{S}}}{T_1} \left(1 - \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{Q}_{\mathrm{K}}} \right) \ , \tag{3.7}$$

iskustvo pokazuje da će uvjet o maksimalnih 15 uključivanja kompresora na sat biti zadovoljen kad je volumen spremnika jednak minutnom protoku kompresora, što otprilike odgovara kolebanju radnog tlaka Δp od 1 bar. Ako se regulacijom kompresora omogući njegov neprekidan rad, može se uzeti Vs =0,5Q_{K} (po minuti).

3.1.4 Razvodna mreža

Optimalna brzina zraka u vodovima v=10-40 m/s, brzine veće od ovih uzrokuju prevelike gubitke. Promjer cjevovoda odabire se tako da gubici tlaka ne prelaze

dopuštenu vrijednost (obično se uzima 5% od radnog tlaka ili 0,1 bar). Prilikom projektiranja potrebno je predvidjeti buduće povećanje potreba za stlačenim zrakom i sukladno tome predimenzionirati promjere cjevovoda. Time se izbjegavaju znatni troškovi za eventualnu ponovnu izradu cjevovoda.

Kako bi se izbjegao prodor kondenzata prema potrošačima:

– vodovi se postavljaju koso – s padom od 1-2%
– izlazi prema potrošačima izvode se na gornjoj strani cijevi
– na krajevima vodova, uvijek se na najnižem mjestu stavlja posuda za odvajanje kondenzata
– vodove treba toplinski izolirati pri prolasku kroz jače zagrijane prostore

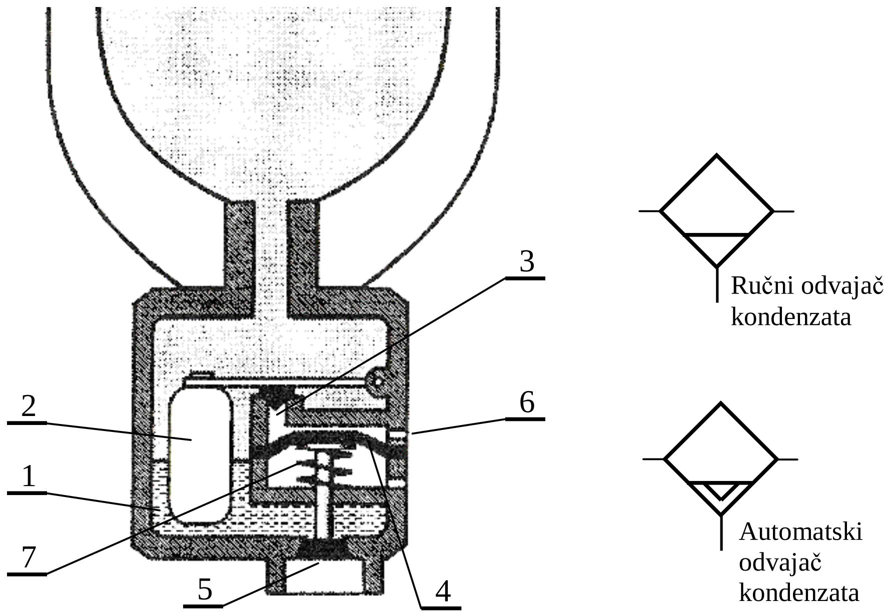
Vodovi moraju biti postavljeni pristupačno, radi održavanja.

Razvod u obliku petlje je razvodni cjevovod izveden u obliku petlje (kruga) na koji se priključuju potrošači. Takav razvod je povoljniji – smanjuju se oscilacije tlaka uzrokovane promjenama u potrošnji, omogućava se isključivanje dijela mreže radi popravaka bez isključivanja cijelog pneumatskog sustava.

Glavni vodovi izrađuju se od metalnih cijevi (čelik, bakar), a u sve većoj mjeri i od plastičnih materijala. Razvodni vodovi na strojevima se u pravilu izrađuju iz plastike.

3.1.5 Odvajač kondenzata

Odvajač kondenzata postavlja se na najnižim mjestima u cjevovodnoj mreži i ispred uzlaznih dionica. Nakupljeni kondenzat potrebno je redovito ispuštati prije nego se čašica za kondenzat napuni preko označene granice. Često se koriste automatski odvajači kondenzata. *Sl. 3.7* prikazuje jedan od mogućih principa rada automatskih odvajača – odvajač s plovkom. Nakupljeni kondenzat (1) podiže plovak (2), čime se otvara prolaz stlačenom zraku (3) koji djelovanjem na membranu (4) otvara ventil za ispuštanje kondenzata (5). Ispuštanjem kondenzata plovak se spušta i zatvara dovod zraka, a prostor iznad membrane rasterećuje se prema atmosferi preko prigušnice (6). Tada opruga (7) zatvara ventil za ispuštanje kondenzata.



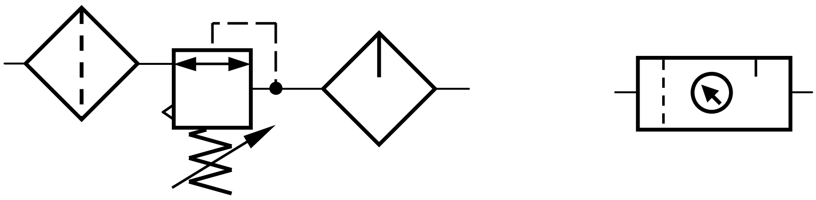
Sl. 3.7 Princip rada automatskog odvajača s plovkom [3]*: 1 – kondenzat, 2 – plovak, 3 – pilot-ventil, 4 – membrana, 5 – ventil za ispuštanje, 6 – prigušnica, 7 - opruga*

U filtrima koji se ugrađuju ispred izvršnih pneumatskih elemenata izdvaja se uz ostalu nečistoću i kondenzat. Uređaj za automatsko odvajanje kondenzata često se ugrađuje i na dno čašice filtra.

3.2 Priprema zraka

Prije ulaska u pneumatske uređaje, stlačeni zrak je potrebno pripremiti, tj. izvršiti:
– pročišćavanje zraka
– zauljivanje zraka
– regulaciju tlaka zraka.

Jedinica za pripremu zraka sastoji se od filtra, regulatora tlaka i mazalice (zauljivač, uljilo). Filtar i regulator tlaka često se isporučuju kao jedinstveni pneumatski element.



Simbol jedinice za pripremu zraka – detaljni i kratki

3.2.1 Filtar

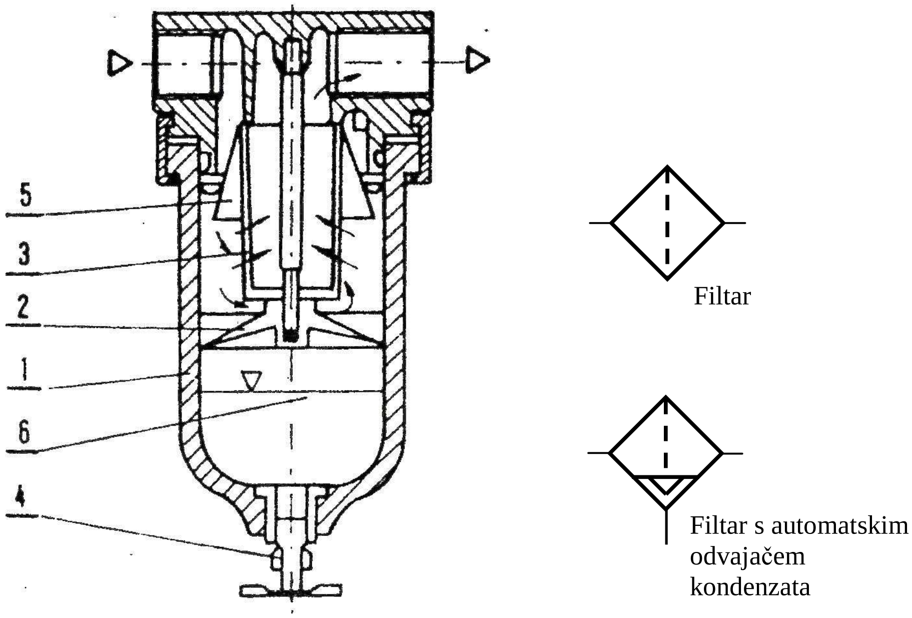
Prije ulaska u pneumatske uređaje potrebno je eliminirati nečistoće (vodu – kapljevinu i paru, kompresorsko ulje, prašinu, produkte korozije). Kompresorsko ulje izloženo je relativno visokim temperaturama u kompresoru (oksidacija) i nije pogodno za podmazivanje pneumatskih uređaja.

U filtrima se za izdvajanje nečistoće koristi nekoliko fizikalnih principa (*Sl. 3.8*). Krilca na ulazu (5) stvaraju vrtlog zraka (efekt ciklona). Zbog centrifugalne sile veće čestice se udaljavaju od osi vrtloga, pa niz stjenku (1) skliznu na tanjur (2). Osim toga, čestice ne mogu pratiti naglo skretanje zraka prema gore. Nakon toga zrak prolazi kroz filtar-uložak (3) od sinterizirane bronce, porozne keramike ili filca, u kojem se zadržavaju finije čestice. Čašica (1) za sakupljanje kondenzata i nečistoće je obično prozirna, kako bi se mogla nadzirati.

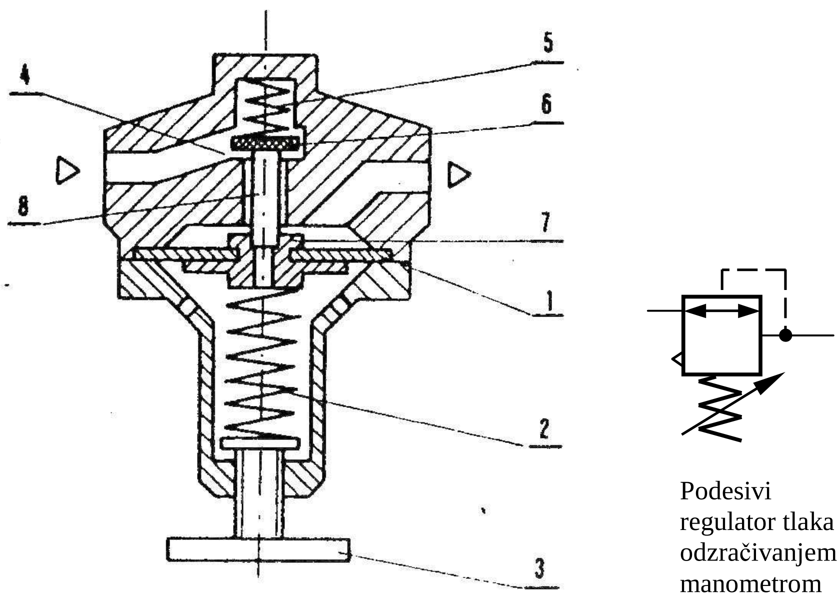
3.2.2 Regulator tlaka

Regulator tlaka osigurava stabilan željeni (podešeni) radni tlak. S jedne strane, on neutralizira oscilacije tlaka zbog promjenljive potrošnje zraka (poremećaj na izlaznoj strani regulatora). S druge strane, u njemu se tlak iz glavnog voda (obično 8÷10 bar) reducira na potrebnu vrijednost radnog tlaka (obično 5÷6 bar).

Tlak na izlazu regulatora (*Sl. 3.9*) podešava se vijkom (3) kojim se mijenja sila u opruzi (2). Pod djelovanjem opruge otvara se ventil (6) i propušta zrak prema izlazu regulatora, povećavajući izlazni tlak. Kad tlak na izlazu poraste, on djeluje na membranu (1) tako da se ventil pritvara i smanjuje protok, čime se izlazni tlak smanjuje. Prilikom značajnijeg porasta izlaznog tlaka membrana se sve više savija, tako da se ventil najprije potpuno zatvori i prekine protok, a daljnjom deformacijom otvara se prolaz zraka (7) kroz membranu od izlaza regulatora prema atmosferi. Kao rezultat ostvaruje se konstantna razina tlaka zraka na izlazu regulatora.



Sl. 3.8 Filtar [5]*: 1 – sabirna posuda, 2 – tanjurasti štitnik, 3 – uložak filtra, 4 – slavina, 5 – krilca, 6 – kondenzat*



Sl. 3.9 Regulator tlaka [5]*: 1 – membrana, 2 – opruga, 3 – vijak, 4 – ulazni tlak, 5 – opruga, 6 – pladanj ventila, 7 – otvor za atm. zrak, 8 – vreteno ventila*

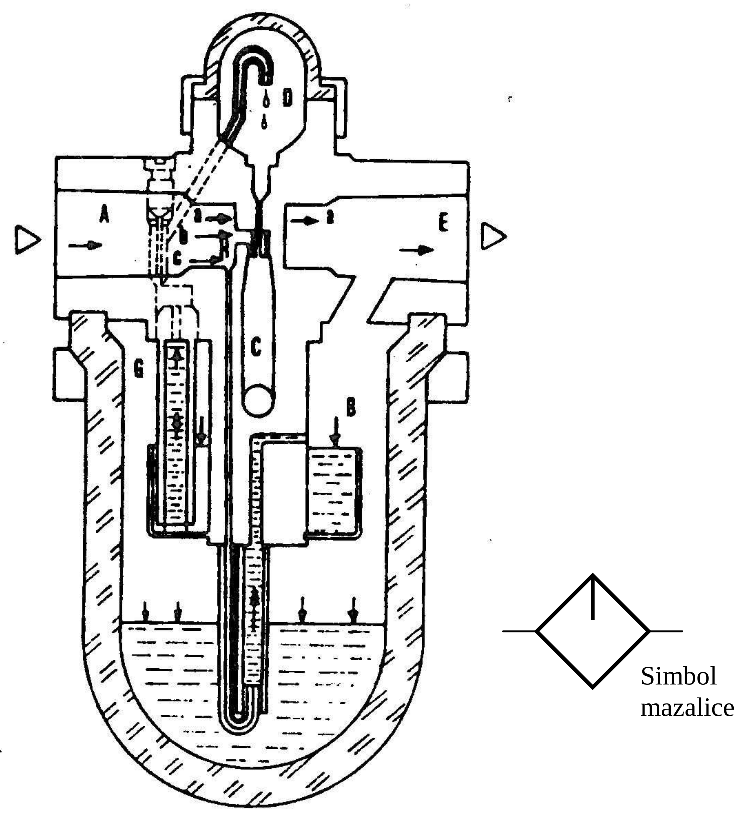
3.2.3 Mazalica

Mazalica (zauljivač) treba ulje raspršiti u finu maglu u struji zraka. Za ubrizgavanje ulja koristi se princip ejektora. Za postizanje fine magle (sitne kapi) potrebna je posebna konstrukcija (*Sl. 3.10*). Glavna struja zraka (a) prolazi kroz ejektor stvarajući podtlak kojim se ulje podiže kroz cjevčicu. Prigušnim vijkom podesi se da to ulje polagano kapa u gornju komoru (D). Slabija struja (b) prolazi kroz manji ejektor u prostor C, raspršujući i noseći ulje. Ova struja ulazi u prostor čašice (B) uz naglo skretanje, pa zato veće kapi padaju natrag u čašicu. Glavni ejektor (E) osigurava blagi podtlak u čašici (B),. povlačeći iz nje zauljeni zrak. Najslabija struja (c), krećući se prema prostoru nižeg tlaka (B), uzgonom podiže ulje u rezervnu (gornju) čašicu.

Rezervna čašica osigurava konstantnu razinu ulja koje se usisava prema komori D, bez obzira na ukupnu količinu ulja u mazalici. Također onemogućen je ulazak taloga u rezervnu čašicu. Često se koriste i filtri za ulje.

Talog iz ulja ne smije doći u pripremljeni zrak (pročistač, rezervna kada).

Pneumatski elementi su tvornički podmazani (90% trajnosti u radu bez zauljivanja zraka). Ako se jednom započne sa zauljivanjem zraka, tvorničko podmazivanje se naruši (odnese), pa se zauljivanje više ne smije obustaviti. Zauljivanje zraka nužno je za motore velikog promjera ili velike brzine rada.



Sl. 3.10 Mazalica [5]

4 PNEUMATSKI ELEMENTI

4.1 Izvršni elementi

Izvršni elementi (pogonski elementi ili aktuatori) pretvaraju energiju stlačenog zraka u mehanički rad. Prema načinu kretanja mogu se podijeliti na

– elementi s ograničenim (njihajućim) kretanjem
    a) translacijski (cilindri)
    b) rotacijski (zakretni cilindri, koračni motori)
– pneumatski motori (rotacijski, s kontinuiranim kretanjem)

U *pneumo-hidrauličkim elementima* vrši se promjena radnog medija, snaga se od zraka predaje na hidrauličko ulje koje se koristi za obavljanje rada.

4.1.1 Cilindri

U pneumatskim sustavima cilindar je najčešći izvršni element. U principu gibanje cilindra je *translacijsko*, jedino je kod zakretnih cilindara *rotacijsko*.

Podjele cilindara

Prema načinu djelovanja:
– jednoradni
– dvoradni
– posebne izvedbe:
    tandem
    višepoložajni
    teleskopski
    bez klipnjače (najčešće magnetni)
    udarni

Cilindri mogu biti *jednoradni i dvoradni*. Jednoradni cilindri vrše koristan rad samo u jednom smjeru, a dvoradni u oba smjera – guraju i vuku. Dvoradni cilindar ponekad ima *dvostranu klipnjaču* (prolaznu) i jednaku korisnu površinu obje strane klipa.

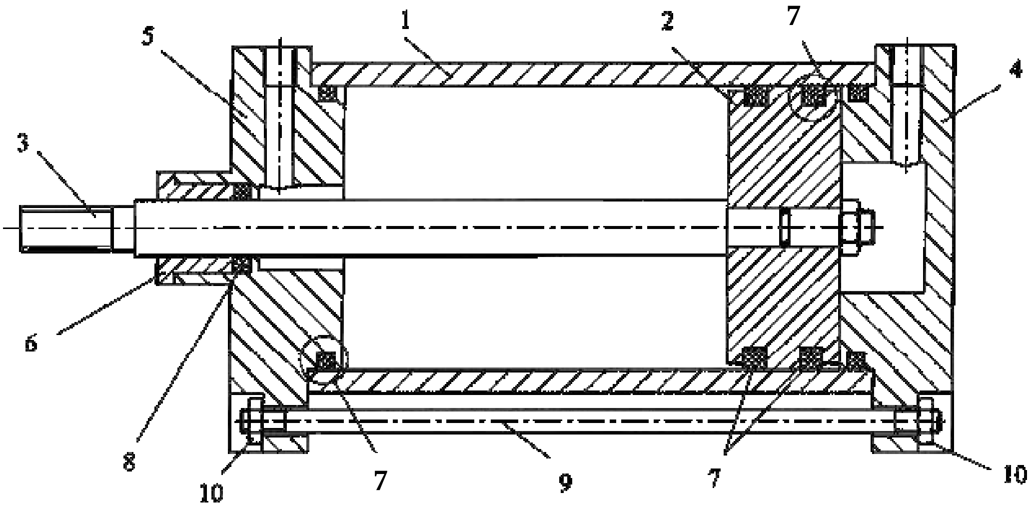
Prema izvedbi:
– klipni
– membranski

U shemama se za obje izvedbe koristi isti simbol.

Dijelovi cilindra (*Sl. 4.1*):
1) plašt cilindra (košuljica)
2) klip
3) klipnjača
4) stražnji poklopac
5) prednji poklopac (kroz koji prolazi klipnjača)
6) vodilica / stezni prsten
7) brtva
8) brtva O-prsten
9) šipka za spajanje
10) matice za spajanje

Priključci za zrak smješteni su u poklopcima cilindra.

Brzina klipa obično je 1-2 m/s (maksimalno do 10 m/s), *hod*: do 2,5 m (maksimalno do 12 m – za cilindre bez klipnjače [2]), *promjer* cilindra: do 500 mm, *sila*: do 30 kn [1]. *Koeficijent korisnog djelovanja* obično se kreće u granicama η=70-90%. Brtve obično podnose temperaturu od –20 do 200 ^{0}C. Klip klipnjača i košuljica su obično čelični, a za košuljicu se poneki puta koriste aluminij ili bronca.

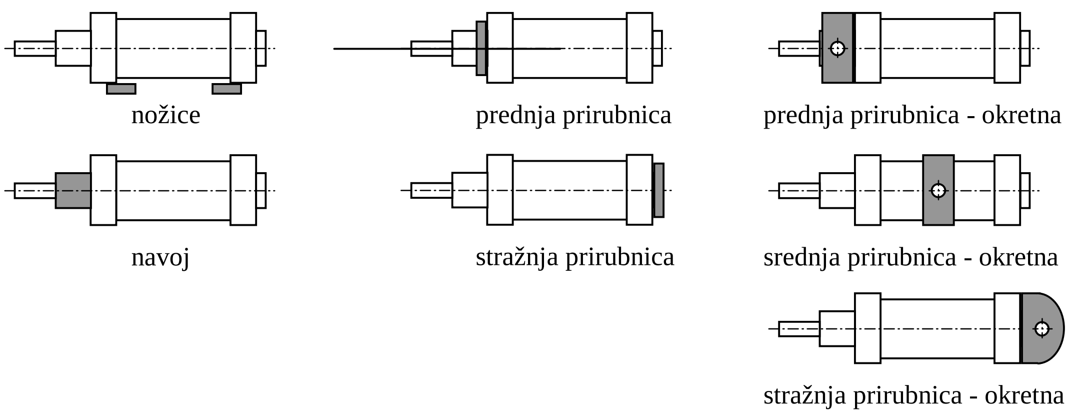


Sl. 4.1 Dvoradni klipni cilindar [6]*: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klipnjača, 4 – prednji poklopac, 5 – stražnji poklopac, 6 – očnica, 7-8 – brtve, 9 – šipka, 10 - matica*

Načini pričvršćenja cilindra su (*Sl. 4.2*):

- s nogama
- s navojem
- s prirubnicom (sprijeda/straga, nepomična/okretna)

Postoji više standardnih povezivanja na klipnjaču, i odgovarajućih normiranih završetaka klipnjače.



Sl. 4.2 Načini pričvršćenja cilindra

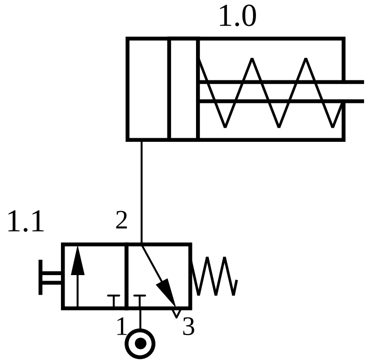
4.1.1.1 Jednoradni cilindri

Vrše koristan rad samo u jednom smjeru, priključak zraka nalazi se samo na prednjoj strani, povratno kretanje najčešće se ostvaruje oprugom (ona ograničava maksimalni hod klipa otprilike na 100 mm) ili težinom tereta. Neki puta povratno kretanje

ostvaruje se stražnjim priključkom na reducirani tlak (regulacijski ventil) ili na spremnik zraka (˝zračni jastuk˝), a stražnja komora tada nema otvor prema atmosferskom tlaku.

Koriste se za pritezanje i izbacivanje izratka, utiskivanje (žig), dodavanje, pomicanje itd., kad nije bitna brzina povratnog kretanja klipa.

Za upravljanje jednoradnim cilindrom koriste se razvodnici 3/2 (3 priključka / 2 položaja, v. Razvodnici i *Sl. 4.3*).



Sl. 4.3 Shema upravljanja i simbol za jednoradni cilindar s oprugom

Statička sila F koju može ostvariti klip jednoradnog cilindra s oprugom u krajnjem položaju iznosi

$F = pS_1 - F_{Omax}$, (4.1)

p – tlak napajanja
S_1 – površina čela klipa (stražnja)
F_{Omax} – sila u opruzi stlačenoj do kraja

Sila na klipnjači iznosi

$F = pS_1 - p_2S_2 - F_t - F_O \approx kpS_1 - F_O$, (4.2)

pri čemu je p_2S_2 sila tlaka u prostoru s oprugom, a F_t sila trenja. Koeficijent k za jednoradni cilindar obično iznosi k=08÷0,9.

Teoretski protok zraka kroz cilindar dobiva se prema izrazu

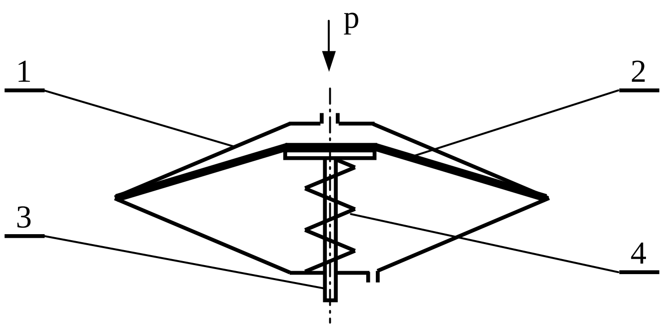
$$Q_{1T} = nLS\frac{p}{p_1} ,\qquad (4.3)$$

pri čemu n označava broj ciklusa u jedinici vremena, L je hod, a S aktivna površina klipa, p je apsolutni radni tlak, a p_1 je tlak usisavanja (atmosferski).

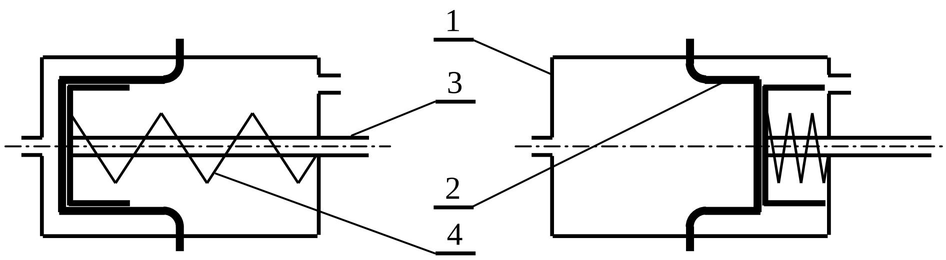
Membranski cilindri

U odnosu na klipne, membranski cilindri omogućavaju veće sile uz kraće hodove i niže frekvencije rada. Postoje dvije izvedbe membrane, *tanjurasta* (*Sl. 4.4*) i *˝putujuća˝* (*Sl. 4.5*).

Pretežno se koriste jednoradni membranski cilindri i to s tanjurastom membranom. Takav cilindar izvodi se za sile do 400 kN (tandem-izvedba) uz hod od maks. 80 mm. Maks. hod cilindra s ˝putujućom˝ membranom iznosi oko 200 mm.



Sl. 4.4 Jednoradni cilindar s tanjurastom membranom: 1 – cilindar, 2 – membrana, 3 – šipka, 4 - opruga

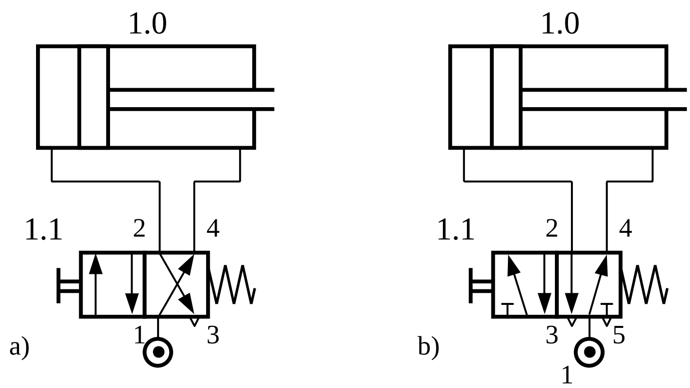


Sl. 4.5 Jednoradni cilindar s ˝putujućom˝ membranom: 1 – cilindar, 2 – membrana, 3 – šipka, 4 - opruga

4.1.1.2 Dvoradni cilindri

Dvoradni cilindri vrše *koristan rad u oba smjera* (guraju i vuku), a priključci za zrak (prednji i stražnji) nalaze se s obje strane klipa. Za pokretanje klipa stlačeni zrak dovodi se u komoru s jedne strane klipa, a istovremeno se komora na suprotnoj strani mora rasteretiti (odzračiti odn. spojiti s atmosferom).

Za upravljanje dvoradnim cilindrom koriste se razvodnici 4/2 ili 5/2 (v. Razvodnici i *Sl. 4.6*).



Sl. 4.6 Dvoradni cilindar – simbol i sheme upravljanja pomoću razvodnika a) 4/2, b) 5/2

P*romjeri* klipa kreću se otprilike u granicama 5-500 mm. *Površina* stražnje strane *klipa* veća je od površine prednje strane klipa za iznos površine presjeka klipnjače ($S_1 > S_2$).

Zato je *sila* $F = pS$ koju klip ostvaruje pri kretanju prema naprijed (udesno) veća od sile pri kretanju unazad (ulijevo) ($F_1 > F_2$). Uz pretpostavku jednakog volumenskog protoka zraka za napajanje kroz stražnji (kretanje unaprijed) i prednji (kretanje unazad) priključak ($Q_1 = Q_2 = Q$), bit će brzina kretanja klipa unazad veća nego unaprijed ($v_1 = Q/S_1 < v_2 = Q/S_2$).

Zanemarivši razliku u površinama klipa, sila na klipnjači dvoradnog cilindra može se procijeniti prema izrazu

$$F = pS_1 - p_2S_2 - F_t \approx kpS_1 \ , \tag{4.4}$$

pri čemu p_2S_2 predstavlja silu tlaka uslijed ostatka zraka u komori s druge strane klipa, a F_t je sila trenja. Koeficijent k za dvoradni cilindar obično iznosi k=04÷0,6.

Teoretski protok zraka kroz cilindar (sveden na stanje na ulazu kompresora) dobiva se prema izrazu

$$Q_{1T} = nL\frac{p}{p_1}(S_1 + S_2) \ , \tag{4.5}$$

pri čemu n označava broj ciklusa (pomaka u oba smjera) u jedinici vremena, L je hod, S_1 i S_2 aktivne površine klipa, p je apsolutni radni tlak, a p_1 je tlak usisavanja (atmosferski).

Brzina kretanja klipa može se odrediti iz zakona količine gibanja zapisanog za klipnjaču

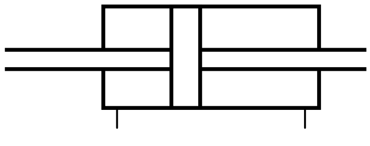
$$(m_K + m_T)a = F + F_T \ , \tag{4.6}$$

gdje m_K označava masu klipa i klipnjače, m_T masu svih opterećenja, F_T su sva vanjska opterećenja na klipnjaču, a F je korisna sila kojom cilindar djeluje na klipnjaču i koja zavisi od položaja i brzine kretanja klipa. Masa m_K često se smije zanemariti. Obično se kretanje klipa može podijeliti u tri faze – ubrzavanje, jednoliko gibanje i usporavanje.

Za relativno duge cilindre potrebno je izvršiti *proračun* klipnjače *na izvijanje*.

Cilindar s dvostranom (prolaznom) klipnjačom

Klipnjača se nalazi s obje strane cilindra, jednake su površine (S_1=S_2) na prednjoj i stražnjoj strani, a isto tako i sile (F_1=F_2) i brzine kretanja klipa (v_1=v_2) u oba smjera.

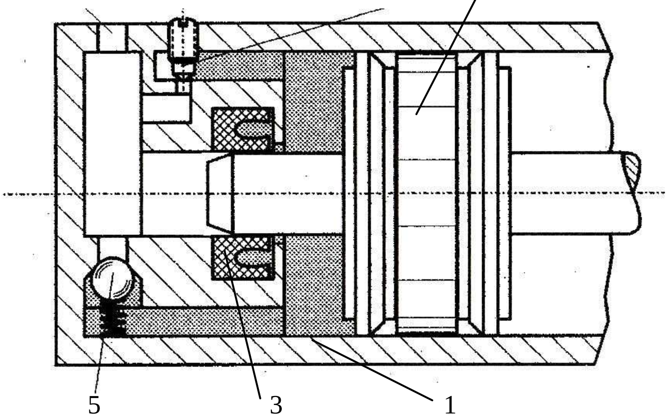


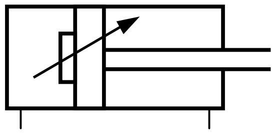
Dvoradni cilindar s dvostranom klipnjačom

Cilindar s ublaživačima udara

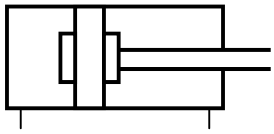
Cilindar s ublaživačem udara (s odbojnikom, s prigušenjem u krajnjem položaju) prigušuje strujanje zraka pri kraju kretanja klipa, kako bi se u krajnjem položaju izbjegli udari klipnjače. Klip nosi manji klip, koji pri kraju hoda zatvara odvod zraka, pa se do kraja hoda zrak odvodi užim kanalom, preko prigušnice (zračni amortizer).

Sl. 4.7 prikazuje cilindar s prigušenjem samo u lijevom krajnjem položaju, prigušenje se može podešavati, a na početku hoda udesno nepovratni ventil omogućava punjenje po cijeloj površini klipa.





Dvoradni cilindar s prigušenjem u jednom smjeru – podesivim



Dvoradni cilindar s prigušenjem u oba smjera

Sl. 4.7 Cilindar s podesivim prigušenjem u krajnjem lijevom položaju [2]*: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – brtva, 4 – prigušnica, 5 – nepovratni ventil*

Odabir cilindra

Kriteriji za odabir cilindra

- potrebna sila
- potreban hod
- potrebna brzina
- konstrukcija cilindra (učvršćenje cilindra, spoj klipnjače, priključci)

Moguć je niz standardnih i specijalnih izvedbi, a za izbor se koriste dijagrami.

Primjer odabira cilindra

Odaberite promjer dvoradnog cilindra ako je potrebna sila na klipnjači F = 350 N, a nazivni tlak iznosi p_n = 6,5 bar.

Ako se za dvoradni cilindar odabere koeficijent k = 0,5, dobije se promjer cilindra

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{F}{kp_n}} = 37\ mm$$

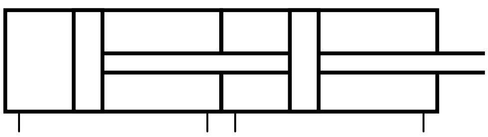
Odabire se standardni cilindar promjera D = 40 mm. Kako bi se tim cilindrom ostvarila željena sila, tlak napajanja treba podesiti na vrijednost

$$p = \frac{F}{k}\frac{4}{\pi D^2} = 5,57\ bar\ .$$

4.1.1.3 Posebne izvedbe cilindara

Tandem cilindar

Dva cilindra (i dva klipa) koriste istu klipnjaču. Uz isti hod i promjer, povećava se sila. Pri tome i klipnjača mora biti šira (čvršća).

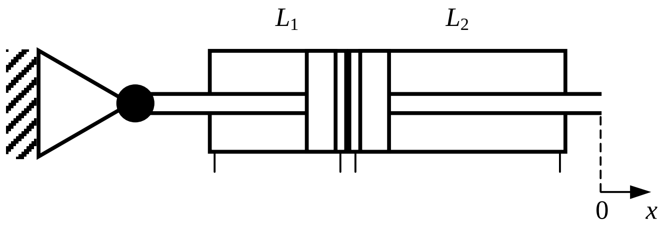


Tandem-cilindar

Cilindri s više položaja

To je serijski spoj dva cilindra koji se dodiruju stražnjom stranom. U slučaju jednakog hoda moguća su 3 različita položaja, inače 4. Ako se hod prvog klipa označi s L_1, a drugog s L_2 (*Sl. 4.8*), moguća su sljedeća 4 položaja vrha klipnjače (x):

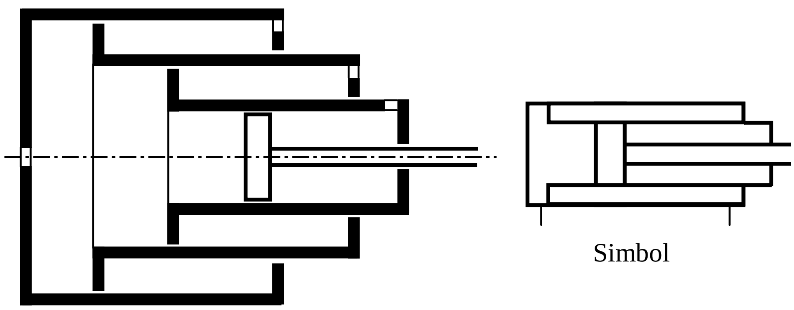
1) $x = 0$
2) $x = L_1$
3) $x = L_2$
4) $x = L_1 + L_2$



Sl. 4.8 Princip rada cilindra s više (4) položaja

Teleskopski cilindar

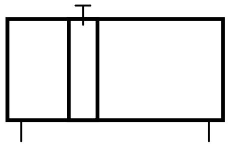
Teleskopski cilindri koriste se kad je potreban dugi hod klipnjače. Oni se sastoje od više cilindara koji su smješteni jedan unutar drugog, pa se izvlače kližući jedan po drugome (*Sl. 4.9*).



Sl. 4.9 Princip rada i simbol teleskopskog cilindra

Cilindar bez klipnjače

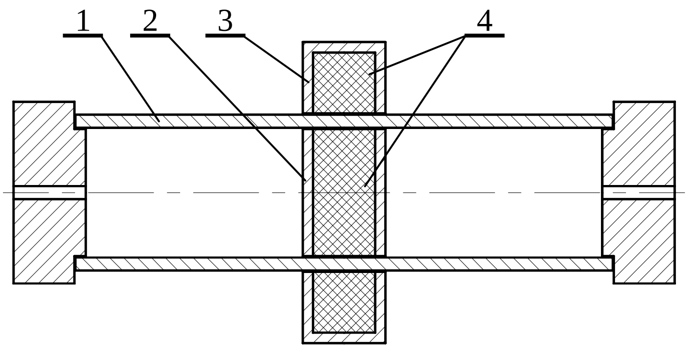
Cilindri s klipnjačom zahtijevaju povećanu duljinu za ugradnju radi izvlačenja klipnjače. Kod cilindara bez klipnjače ta povećana duljina nije potrebna, zato se oni sve češće koriste. Za pomicanje tereta imaju vanjski klizač, a često i vodilice za njega. Omogućavaju posebno duge hodove klipa odn. pomake, do 12 m [2].



Simbol cilindra bez klipnjače

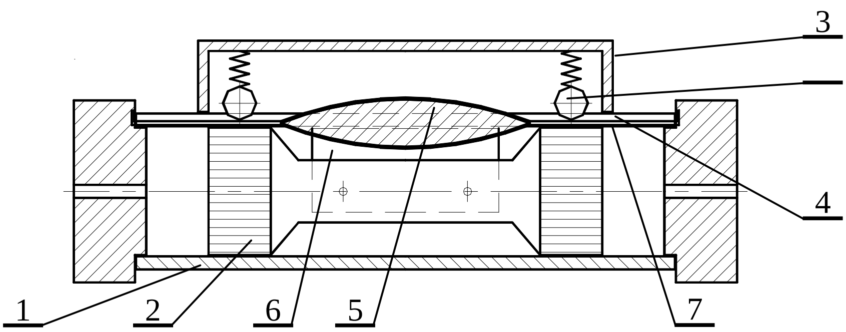
Magnetski cilindar (*Sl. 4.10*) silu klipa prenosi na vanjski klizač putem trajnih magneta. Pneumatski sustav je zatvoren i neosjetljiv na nečistoće. Opterećenje je

ograničeno maksimalnom silom magneta. Prekoračenjem te sile klizač sklizne, pa preopterećenje nije dopušteno.



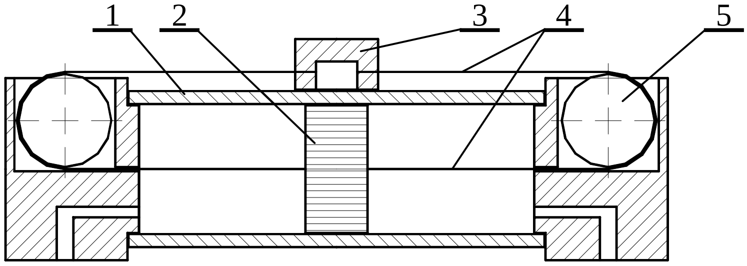
Sl. 4.10 Princip magnetskog cilindra: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klizač, 4 - magneti

Cilindar s uzdužnim prorezom (*Sl. 4.11*) ima klip znatne duljine koji u izvjesnoj mjeri može preuzeti poprečna opterećenja i momente. Za prijenos sile cilindar ima uzdužni prorez kroz koji se kreće odgovarajući zub klizača. Zub je s vanjske strane pomoću ploče čvrsto vezan za šipku klipa. S vanjske i unutrašnje strane zuba prolazi po jedna čelična traka za brtvljenje proreza cilindra. Elastičnim brtvenim elementom ove se dvije trake pritišću jedna uz drugu na prednjem i stražnjem kraju klipa. Zbog brtvljenja javljaju se pri pomicanju klipa znatne sile trenja.



Sl. 4.11 Princip cilindra s uzdužnim prorezom: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klizač, 4 – prorez, 5 – zub, 6 – ploča, 7 – traka, 8 – brtveni element

Cilindar s trakom ili užetom (*Sl. 4.12*) ima klip vezan na čeličnu traku ili uže umjesto klipnjače. Sila se na klizač prenosi pomoću trake (užeta) preko odgovarajućih kolotura. Gubici propuštanja kroz brtve za traku (uže) relativno su veliki.

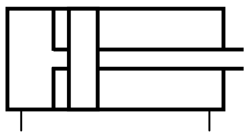


Sl. 4.12 Princip cilindra s trakom ili užetom: 1 – cilindar, 2 – klip, 3 – klizač, 4 – traka ili uže, 5 - kolotura

Udarni cilindar

Udarni cilindar koristi se kad je potrebno ostvariti udarno djelovanje (kovanje, zakivanje, utiskivanje i sl.).

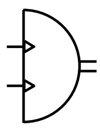
Karakteristika ovih cilindara je masivni klip bez klipnjače koji na jednom kraju hoda udara u alat. Svojim kretanjem naprijed-nazad klip naizmjenično otvara i zatvara dva aksijalna provrta u cilindru. Time se kroz provrte naizmjenično odzračuje prednja i stražnja komora cilindra. To dovodi do naizmjeničnih promjena tlaka koje prebacuju položaj ventila za napajanje (bistabil). Tako se kroz taj ventil tlak napajanja naizmjenično dovodi u prednju i stražnju komoru, što dovodi do oscilatornog kretanja klipa naprijed-nazad.



Simbol udarnog cilindra

4.1.1.4 Zakretni cilindri

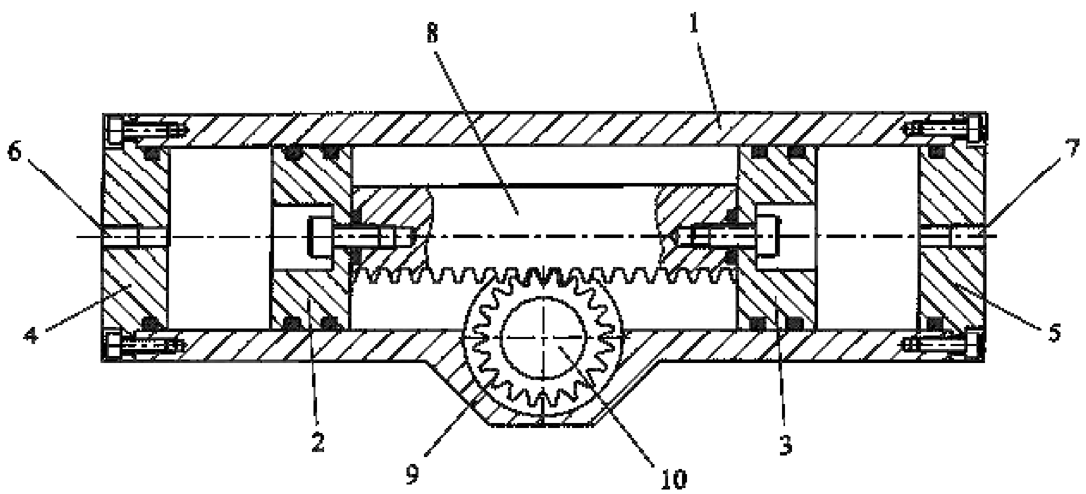
Zakretni cilindri ili cilindri za kružno gibanje ostvaruju ograničeno (njihajuće) kružno gibanje (okretanje, uvrtanje i sl.). Simbol zakretnog cilindra je polukrug, čime se simbolizira ograničeno kružno gibanje.



Simbol zakretnog cilindra

Cilindar sa zubnom letvom

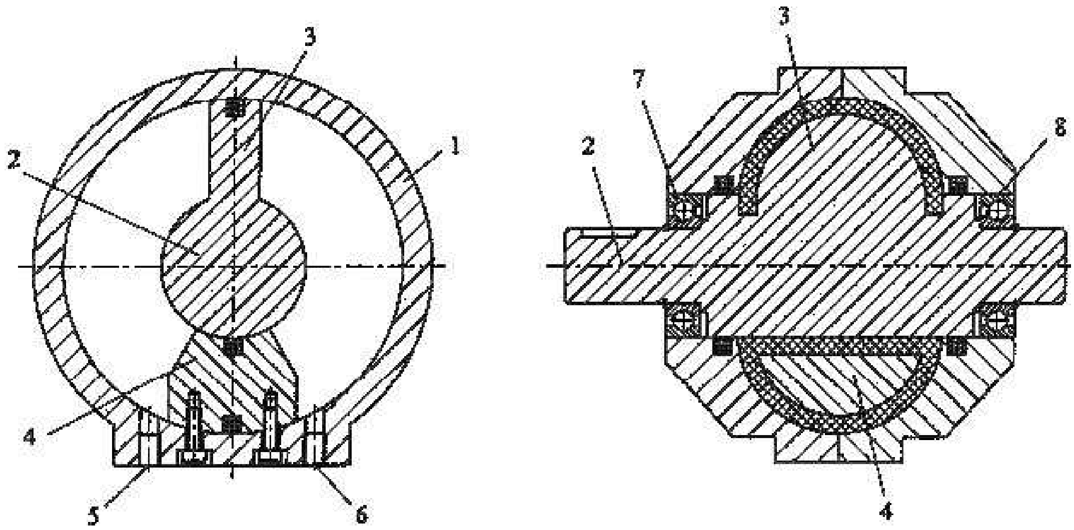
Dio klipnjače dvoradnog cilindra izveden je kao zubna letva (*Sl. 4.13*), pomoću koje se pomak klipa pretvara u kružno gibanje zupčanika i izlaznog vratila. Cilindri sa zubnom letvom izvode se za maksimalno dva zakreta vratila.



Sl. 4.13 Cilindar sa zubnom letvom [6]*: 1 – cilindar, 2-3 – klip, 4-5 – poklopci, 6-7 – priključci, 8 – zubna letva, 9 – zupčanik, 10 - vratilo*

Cilindar sa zakretnom pločom

Ovaj cilindar izgleda poput lamelnog pneumatskog motora s jednom lamelom (zaokretnom pločom, krilom - *Sl. 4.14*). Zakretna ploča ima brtvu prema cilindru, a vezana je na vratilo. Zakretanje se ostvaruje dovođenjem stlačenog zraka s jedne ili druge strane ploče. Mogući kut zakreta vratila redovito je manji od 360^0.



Sl. 4.14 Cilindar sa zakretnom pločom [6]*: 1 – cilindar, 2 – vratilo, 3 – zakretna ploča, 4 – razdjelna ploča, 5-6 – priključci, 7-8 – ležajevi*

Za ograničeno kružno gibanje koriste se još cilindar s *vratilom sa zakrivljenim utorom*, izvršni element *sa zupčastim remenom* i *koračni motori*.

4.1.2 Primjer – Dimenzioniranje sustava dobave zraka

Ovaj primjer maksimalno je pojednostavljen obzirom na prisutne pneumatske elemente i metode proračuna. Njime se jedino nastoji pružiti što jasniji uvid u zavisnosti među pneumatskim elementima i odnose među bitnim parametrima sustava. Zadatak je dimenzionirati sustav za dobivanje stlačenog zraka za trivijalni pneumatski sustav. Napomena: u formulama su sve veličine izražene u koherentnom sustavu jedinica (sve veličine treba izraziti u osnovnim jedinicama SI sustava).

Odabir cilindra

Potrebno je odabrati n_C=10 istovjetnih dvoradnih cilindara s prolaznom klipnjačom za neki proces u kojem cilindar mora ostvarivat silu F = 1,6 kN na klipnjači u oba smjera uz hod h = 6cm. Hod cilindra traje τ_C = 2s, a broj ciklusa cilindra (uvlačenje i izvlačenje klipnjače) u minuti iznosi n=5 uz koeficijent istodobnosti k_i = 60%. U praksi, ovakvi podaci izračunaju se iz uvjeta konkretnog radnog procesa.

Ako se pretpostavi radni tlak p_{pr} = 7 bar i promjer klipnjače d_K = 20mm, uz uobičajeni koeficijent k=0,5 (zbog trenja i ostatka tlaka) dobiva se potrebni promjer klipa dvoradnog cilindra

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{F}{kp_{pr}} + d_K^2} = 78,87\ mm$$

Odabire se standardni cilindar promjera D = 80 mm, tako da potrebni radni tlak iznosi

$$p = \frac{F}{k}\frac{4}{\pi(D^2 - d_K^2)} = 6,79\, bar \quad .$$

Protok

Ako se pretpostavi da gubici zraka u cjevovodu iznose uobičajenih k_{GV} = 20%, ukupni srednji potrebni protok zraka sveden na ulaz kompresora (tj. pri atmosferskom tlaku p_a = 1,01325 bar, ρ_a = 1,29 kg/m^3) za dvoradne cilindre (dvostruki broj ciklusa) iznosi

$$Q_1 = (1 + k_{GV})\frac{p + p_a}{p_a} 2nn_C \frac{\pi(D^2 - d_K^2)}{4} h = 4,355 \frac{l}{s}$$

Očekuje se da maksimalni protok kroz cjevovod neće premašivati vrijednost

$$Q = (1 + k_{GV})\frac{k_i n_C}{\tau_C}\frac{\pi(D^2 - d_K^2)}{4} h = 1,018 \frac{l}{s}$$

Cjevovod

Kako bi se u najvećoj mjeri pojednostavio proračun cjevovoda, ne proračunava se razvodna mreža, nego se pretpostavlja da su svi cilindri smješteni vrlo blizu završetka cjevovoda za dobavu zraka. Duljina cjevovoda iznosi L = 60 m, a odabire se promjer cijevi d = 15 mm. Prema jednadžbi stanja idealnog plina gustoća zraka u cijevi iznosi

$$\rho = \rho_a \frac{p + p_a}{p_a} = 9,935 \frac{kg}{m^3}$$

Koristeći odgovarajuće metode i priručnike određuju se koeficijent trenja za odabranu cijev, npr. λ=0,04, i ukupni lokalni gubici za projektiranu armaturu, npr. ukupna ekvivalentna duljina L_e = 15 m (zbroj ekvivalentnih duljina cjevovoda svih lokalnih gubitaka). Uz te vrijednosti pad tlaka uslijed gubitaka u cjevovodu iznosi

$$\Delta p_F = \lambda \frac{L + L_e}{d} \rho \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4} = 0,3296\, bar$$

Ova vrijednost ne premašuje 5% (0,35 bar) radnog tlaka, pa se prihvaća promjer d = 15 mm. U suprotnom slučaju, treba odabrati novi promjer i ponoviti proračun cjevovoda.

Kompresor

Odabire se kapacitet kompresora dvostruko veći od potrebnog, tj. $Q_K = 2Q_1$ = 8,7 l/s, tako da će kompresor biti uključen 50% ukupnog radnog vremena. Pretpostavlja se stupanj korisnog djelovanja kompresora η_K = 60%, a potrebni tlak je

$p_2 = p + \Delta p_F$ = 7,12 bar

tako da potrebna snaga kompresora iznosi

$$P_K = \frac{p_a Q_K}{\eta_K} \ln \frac{p_2 + p_a}{p_a} = 3,06\, kW$$

Spremnik

Dozvoljeno je 15 uključivanja kompresora na sat, što znači da minimalno dozvoljeno vrijeme ciklusa uključivanja i isključivanja iznosi τ = 4 min. Ako se odabere razlika tlaka uključivanja i isključivanja (on/off regulacija) Δp = 0,5 bar, volumen spremnika treba iznositi

$$V_S = \frac{Q_1 \tau p_a}{\Delta p}\left(1 - \frac{Q_1}{Q_K}\right) = 1,058\, m^3$$

Volumen spremnika V_S bio bi otprilike dvostruko manji, a razlika tlaka Δp dvostruko veća, kad bi se na uobičajeni način uzeo volumen spremnika jednak minutnom protoku kompresora Q_K.

Hladnjak

Zbog sušenja zraka, hladnjak se postavlja neposredno iza kompresora. Radi jednostavnosti pretpostavlja se da je sav utrošeni rad kompresora predan stlačenom zraku (termički izolirani kompresor bez među-hladnjaka). Ako se pretpostavi da entalpija zavisi samo od temperature zraka (idealni plin, c_p=1001 J/kgK), te ukoliko su temperature na ulazu u kompresor i na izlazu iz hladnjaka jednake, jednadžba održanja energije zahtijeva da odvedena osjetna toplina (snaga) bude jednaka snazi kompresora. Ovdje se pretpostavlja da temperatura zraka na ulazu u kompresor iznosi t_a = 20 ^{0}C, uz relativnu vlažnost zraka φ_a=95% (tlak isparavanja vode pri 20 ^{0}C iznosi p_1' = 2337 Pa, a entalpija zasićene pare), dok se kao izlazna temperatura iz hladnjaka odabire t_3 = 25 ^{0}C (tlak isparavanja vode pri 25 ^{0}C iznosi p_3' = 3169 Pa).

Tada snaga odvedene osjetne topline iznosi

$$P_{Qo} = P_K - c_p \rho_a Q_K (t_3 - t_a) = 3,003\, kW$$

Hladnjak mora odvesti i latentnu toplinu koja se oslobađa ukapljivanjem viška vlage. Ta kondenzirana voda odvaja se i uklanja u samom hladnjaku ili neposredno iza njega. U ulaznom zraku parcijalni tlak pare iznosi

$$p_{p1} = \varphi_a p_1' = 2220 \text{ Pa}$$

a vlažnost je

$$x_a = 0,6222 \frac{p_{p1}}{p_a - p_{p1}} = 1,394\%$$

Iz hladnjaka, pri apsolutnom radnom tlaku p_2+p_a, izlazi zasićeni zrak (tj. zrak koji zadržava najveću moguću količinu vlage φ_3 = 100%, $p_{p3} = p_3'$) s vlažnošću

$$x_3 = 0,6222 \frac{p_3'}{p_2 + p_a - p_3'} = 0,243\%$$

tako da maseni protok kapljevite vode koja se izdvaja iznosi

$$\dot{m}_k = \rho_a Q_K \left(\frac{x_a}{1 + x_a} - \frac{x_3}{1 + x_3}\right) = 0,457\, \frac{kg}{h}$$

Ako se parcijalni tlakovi u kompresoru približno povećavaju u jednakim omjerima, parcijalni tlak pare na izlazu iz kompresora može se procijeniti prema

$$p_{p2} = p_{p1} \frac{p_2 + p_a}{p_a} = 17820 \text{ Pa}$$

Entalpija zasićene pare pri tlaku p_{p2} iznosi h_2'' = 2605 kJ/kg, a entalpija zasićene kapljevite vode pri temperaturi 25 ^{0}C iznosi h_3' = 104,9 kJ/kg, pa se snaga odvedene latentne topline može procijeniti kao

$$P_{Ql} = \dot{m}_k (h''_2 - h'_3) = 318 \text{ W}$$

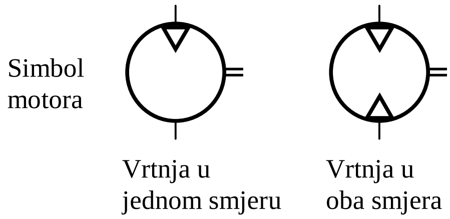
tako da potrebna ukupna toplinska snaga hladnjaka iznosi

$P_Q = P_{Q\mathrm{o}} + P_{Ql} = 3{,}321$ kW

4.1.3 Pneumatski motori

Pneumatski motori su rotacijski izvršni elementi kojima se ostvaruje kontinuirano kružno gibanje vratila. U odnosu na kompresore u motorima se vrši suprotna pretvorba energije (pretvorba energije tlaka zraka u mehanički rad). Konstrukcija motora i kompresora je slična, a ponekad identična, tada se isti stroj može koristiti kao motor i kompresor. Kod nekih konstrukcija motora je smjer vrtnje proizvoljan, a promjena smjera se postiže promjenom priključka za stlačeni zrak. U pneumatske pogonske strojeve ubrajaju se:

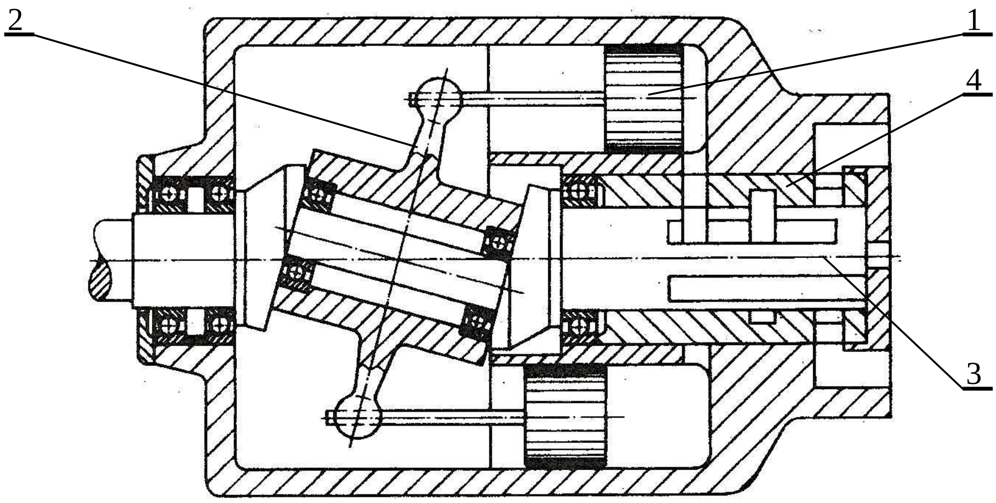
- klipni motori
  - aksijalni
  - radijalni
- lamelni motori
- zupčasti motori
- vijčani motori
- zračne turbine
- koračni motori (ponekad mogu ostvariti kontinuiranu vrtnju)



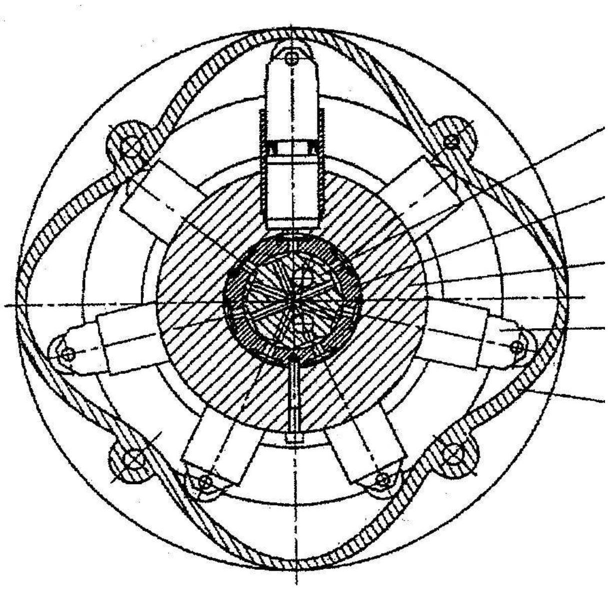
Klipni motori

Kod klipnih motora često se ne koriste ventili, nego se raspodjela zraka ostvaruje putem *upravljačke ploče* (obično ima raspor u obliku polumjeseca). Moguća je vrtnja u oba smjera. Omjer mase i snage ovih motora je relativno nepovoljan odn. mali, a volumetrički gubici su mali. Postižu snagu 1÷20 kW uz brzinu vrtnje od 500÷5000 okr/min [3].

Kod *aksijalnih klipnih motora* (*Sl. 4.15*) pretvaranje pravocrtnog gibanja klipa u kružno gibanje vratila ostvaruje se nagibnom ili oscilirajućom pločom (aksijalni ekscentar).



Sl. 4.15 Aksijalni motor – izvedba s oscilirajućom pločom [2]*: 1 – klip, 2 – oscilirajuća ploča, 3 – razvodni prsten, 4 – upravljački prsten*

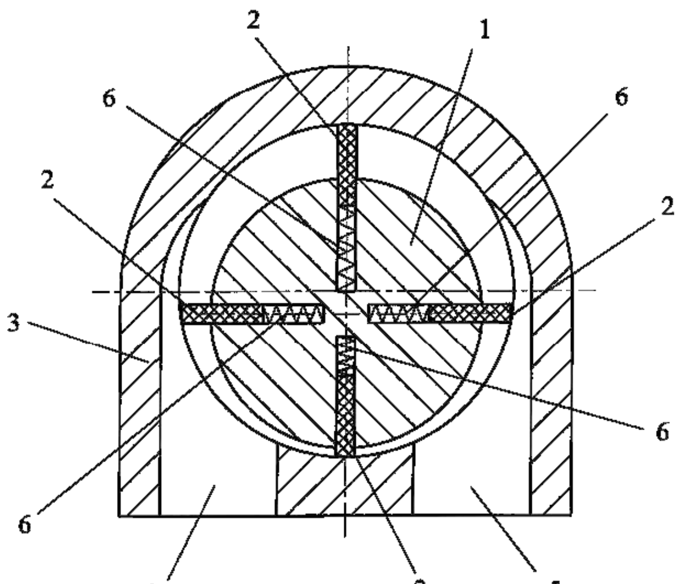


Sl. 4.16 Radijalni motor [2]

Radijalni klipni motori imaju vanjski mirujući ekscentar po kojem se kližu klipovi koji rotiraju zajedno s blokom motora. *Sl. 4.16* prikazuje višestupanjski motor s više 'ekscentara', tako da klip obavlja 4 ciklusa u jednom okretu. Rotor se tada postavlja u centralni položaj.

Lamelni motor

Kod lamelnog motora rotor se postavlja ekscentrično u odnosu na stator (*Sl. 4.17*). Zrak je zarobljen u prostoru između lamela, površine rotora i površina statora (cilindar i 2 bočne površine). Ponekad se i kod lamelnih motora koriste dvije radne komore i centralni položaj rotora. Neke izvedbe imaju na sredini hoda dodatni otvor za odzračivanje. Uobičajene brzine vrtnje su 6000÷30000 okr/min. Omjer snage i mase ovih motora je relativno velik.



Sl. 4.17 Princip rada lamelnog motora [6]*: 1 – rotor, 2 – lamela, 3 – stator, 4-5 – priključci, 6 - opruga*

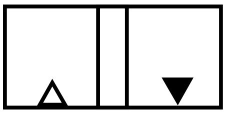
4.1.4 Pneumo-hidraulički elementi

U pneumo-hidrauličkim elementima vrši se promjena radnog medija, snaga se od zraka predaje na hidrauličko ulje koje se koristi za obavljanje rada. Korištenje hidrauličkog ulja omogućuje da se postignu *male i jednolične brzine kretanja* i/ili *velike sile*. Osnovne grupe pneumo-hidrauličkih elemenata su:

– pretvarač tlačnog medija
– uljni kočioni cilindar
– pojačalo tlaka

Pretvarač tlačnog medija

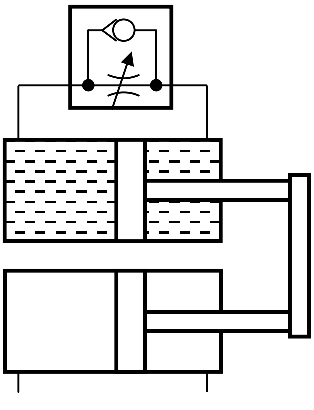
Zamjena radnog medija obavlja se u dvoradnom cilindru s klipom bez klipnjače. S jedne strane klipa dovodi se stlačeni zrak, a s druge se odvodi ulje pod tlakom.



Simbol pretvarača tlačnog medija

Uljni kočioni cilindar

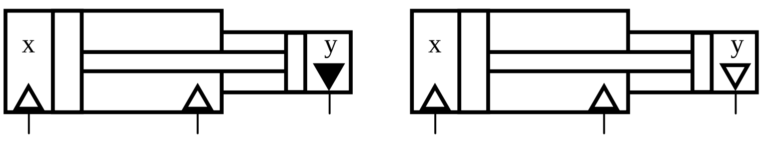
Uljni kočioni cilindar izvodi se mehaničkom vezom (poluga) dva cilindra od kojih je jedan priključen na zrak, a drugi na ulje. Polugom se cilindri mogu vezati paralelno (*Sl. 4.18*)i serijski (tandem-cilindar). Priključci uljnog cilindra povezuju se preko podesive prigušnice (v. Protočni ventili) – na taj način podešava se brzina kretanja klipa. Podesiva prigušnica na slici usporava klip samo pri gibanju udesno. Pri gibanju ulijevo otvara se prikazani nepovratni ventil.



Sl. 4.18 Kočioni cilindar u paralelnoj vezi

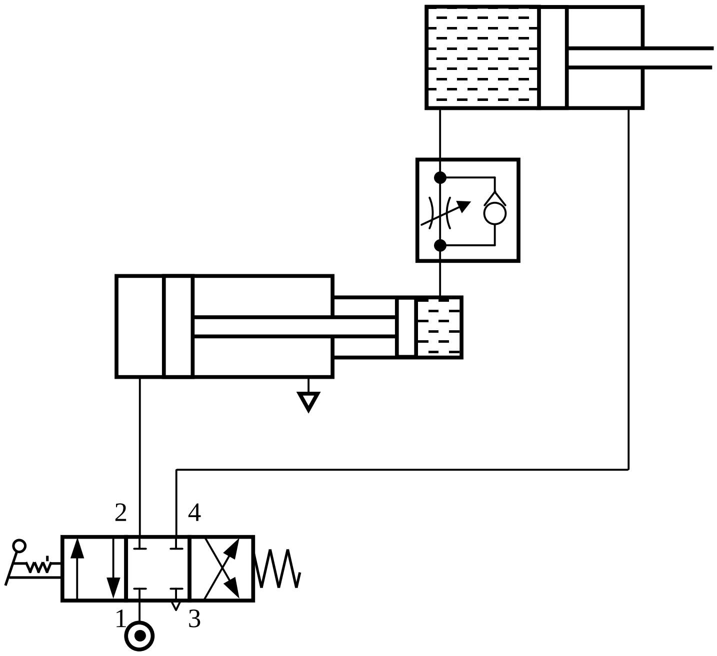
Pojačalo tlaka

Pojačalo tlaka pretvara niži tlak zraka u viši tlak ulja (ili zraka). Sukladno omjeru površina klipova, pojačanje obično iznosi od 1:4 do 1:80.



Simbol pojačala tlaka ulja Simbol pojačala tlaka zraka

Na donjem primjeru (*Sl. 4.19*) prikazano je pojačanje uz zamjenu radnog medija zraka uljem, i to samo za gibanje klipa udesno. Lako je složiti razne druge kombinacije – za vježbu nacrtajte shemu za obostranu promjenu medija bez pojačanja. Upravljanje klipa vrši se pomoću 4/3 razvodnika (4 priključka, 3 položaja – v. Razvodnici). Razvodnik se pokreće ručicom s uskočnikom koji osigurava da sva 3 položaja razvodnika budu stabilna.



Sl. 4.19 Primjer promjene medija uz pojačanje

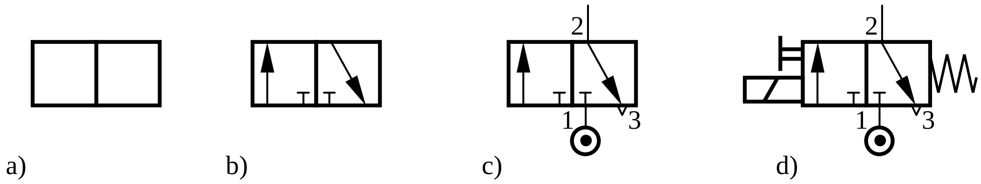
4.2 Ventili

Ventili – pneumatski upravljački elementi – su uređaji za regulaciju i usmjeravanje radnog medija. Moguće funkcije ventila uključuju: propuštanje, zaustavljanje i promjenu smjera medija; regulaciju protoka i tlaka. U pneumatskom upravljanju ventili prenose energiju i/ili informaciju.

Podjela:

- razvodnici
- zaporni ventili
- tlačni ventili
- protočni ventili
- kombinirani ventili
- cijevni zatvarači

U pneumatskim shemama koriste se *simboli ventila* koji prikazuju njihovu funkciju (ne konstrukciju). Ventil se prikazuje kvadratnim simbolima – broj kvadrata odgovara broju mogućih razvodnih položaja danog ventila (*Sl. 4.20* a). Strelice ucrtane u polja (kvadrate) prikazuju razvodne putove i smjer protoka medija (b). Zatvoren put označava se poprečnom crtom unutar polja. Dovodni i odvodni priključci ucrtavaju se na polju nultog (mirnog) položaja (položaj koji ventil zauzima kad na njega ne djeluje upravljački signal) ili na polju polaznog položaja, ako ventil nema nultog položaja (c). Način aktiviranja označava se sa strane (d) – u ovom slučaju oprugom i kombinirano: elektromagnetom ili ručno.



Sl. 4.20 Značenje simbola ventila

Priključci ventila označavaju se brojevima, i to:

- radni priključci: 2, 4, 6...(A, B, C...)
- napajanje 1 (P)
- odzračivanje 3, 5 (R, S, T)
- priključak na upravljačke vodove 12, 14 (X, Y, Z)

4.2.1 Razvodnik

Razvodnici usmjeravaju tok radnog medija – propuštanjem, zatvaranjem, promjenom smjera toka. Razvodnici se razlikuju po sljedećim karakteristikama:

- tip
- veličina
- način aktiviranja
- duljina trajanja signala
- konstrukcija

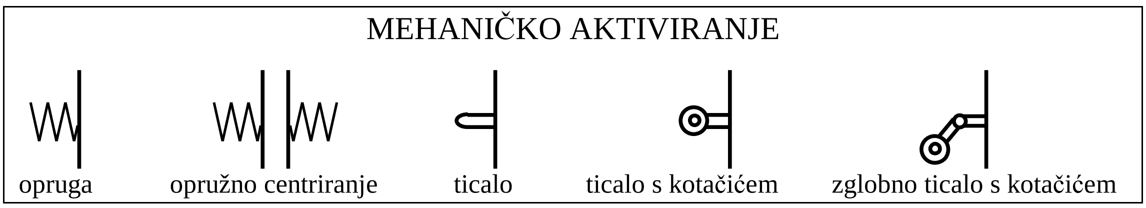
Tip razvodnika određen je brojem priključaka i razvodnih položaja (polja u simbolu). Oznaka tipa razvodnika stavlja se ispred naziva, npr. "3/2 razvodnik" (čita se tri kroz dva) označava razvodnik s 3 priključka i dva razvodna položaja.

Veličina razvodnika opisana je priključnom mjerom odnosno nazivnim promjerom (npr. ¼") koja se odabire prema protoku medija.

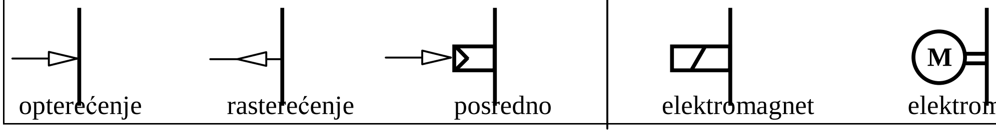
Aktiviranje može biti neposredno i posredno (neposredni i posredni razvodnici). Mogući *načini* (neposrednog) *aktiviranja* razvodnika su:

- fizičko
- mehaničko
- tlačno
- električko
- kombinirano



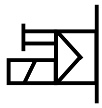


TLAČNO AKTIVIRANJE	ELEKTRIČKO AKTIVIRANJE



PRIMJER KOMBINIRANOG AKTIVIRANJA

elektromagnet i pomoćno fizičko aktiviranje
preko posrednog (pilot) ventila



Prema *duljini trajanja signala* potrebnoj za aktiviranje razvodnika, razvodnici se dijele na:

– razvodnike *s trajnim aktiviranjem* (monostabilne) koji su aktivirani u vremenu dok traje signal
– razvodnike *s trenutnim aktiviranjem* (bistabilne) koji su trajno aktivirani kratkim signalom (funkcija pneumatske memorije).

Konstrukcija je bitna u pogledu **trajnosti**, **sile** potrebne za aktiviranje, **veličine**, **načina aktiviranja**, **održavanja**, **pouzdanosti** rada razvodnika itd. Prema konstrukciji razvodnici se dijele na:

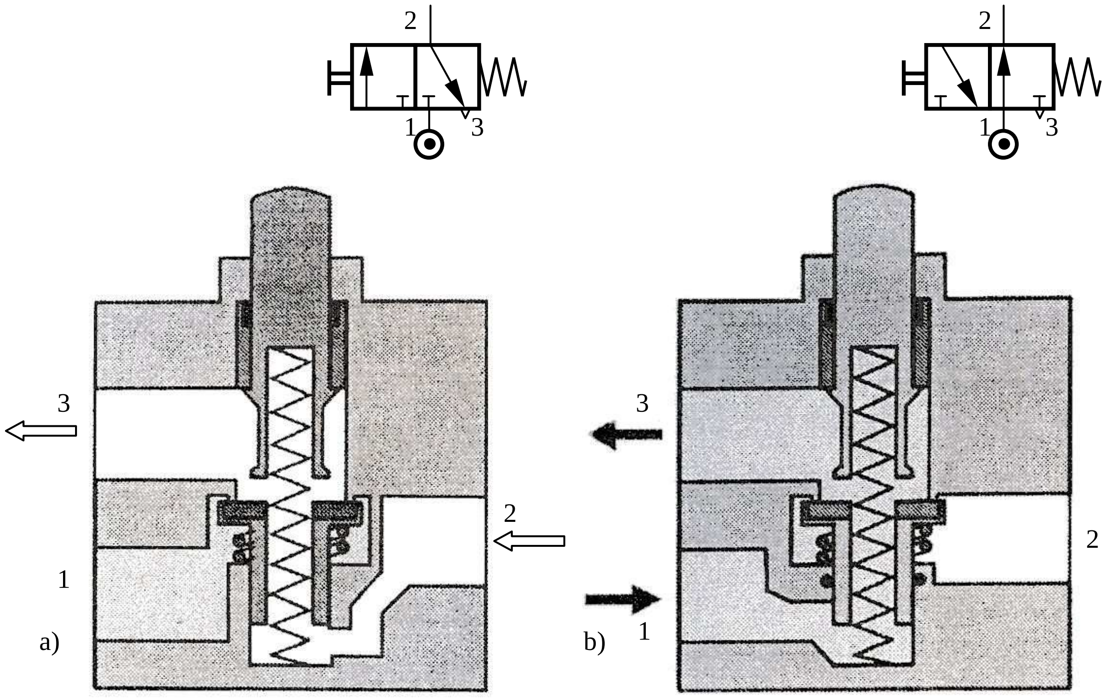
- Razvodnike *sa sjedištem*:

– ravni (tanjurasti)
– konusni
– kuglasti

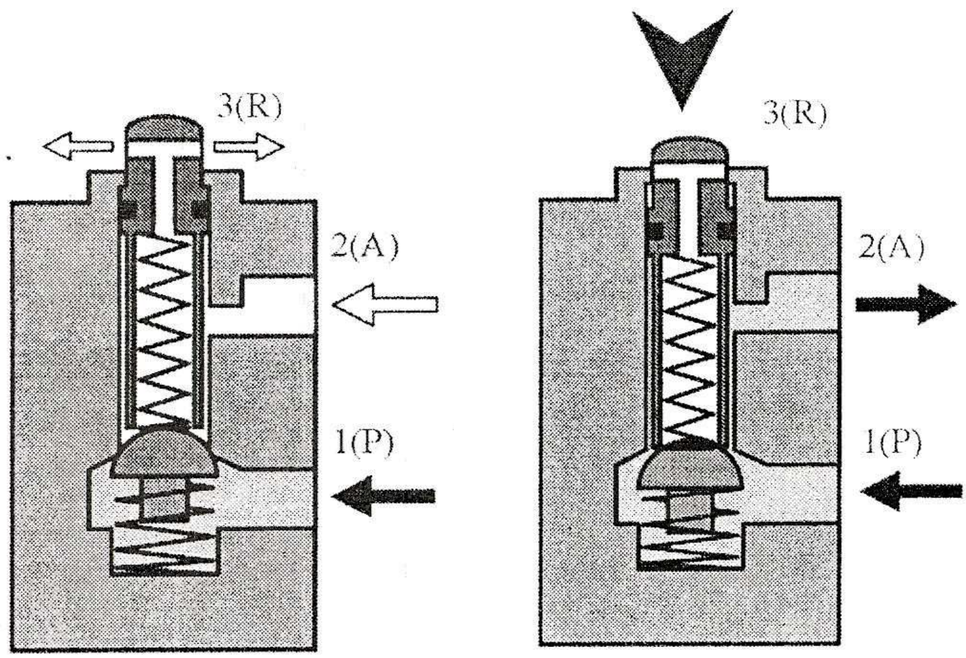
- Razvodnike s *kliznim prekrivanjem*:

– klipni
– pločasti
– kulisni

Otvaranje / zatvaranje *ventila sa sjedištem* vrši se pomoću pladnja (oblik tanjura, ploče, stošca ili kugle) koji može otkriti / prekriti i pritiskanjem zatvoriti otvor koji se naziva sjedište. Sjedište je najčešće obloženo gumenom brtvom. Potreban je relativno mali pomak pladnja za otvaranje znatne protočne površine. Sila ovakvog aktiviranja je relativno velika, a vrijeme kratko. Ventili nisu naročito osjetljivi na nečistoće, jer struja zraka odnosi nečistoću i čisti sjedište. Tip razvodnika sa sjedištem obično je 2/2 ili 3/2 (*Sl. 4.21*, *Sl. 4.22*), a složeniji tipovi izvode se kombinacijom većeg broja razvodnika.

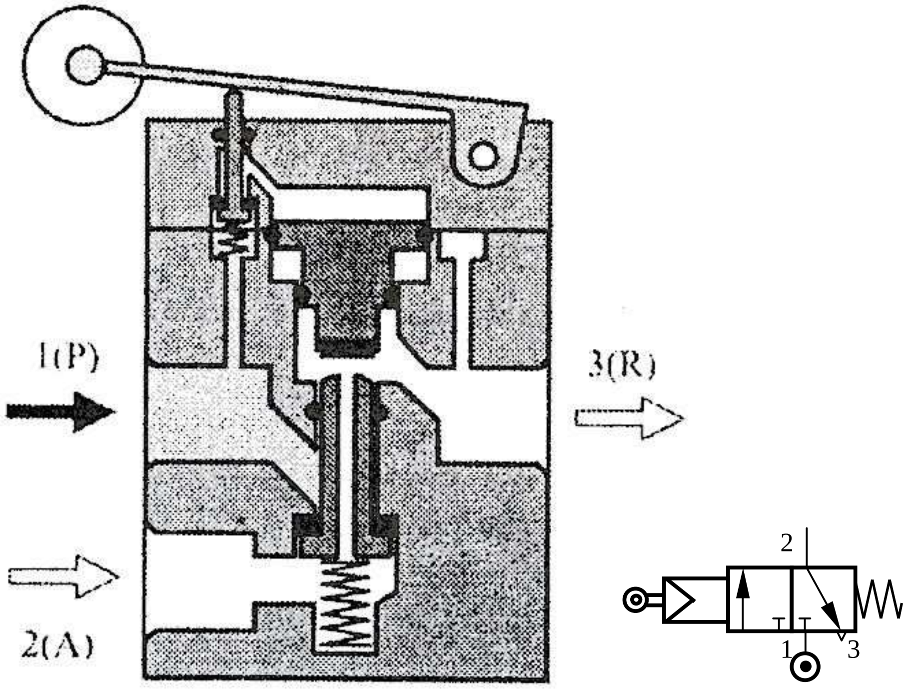


Sl. 4.21 Tanjurasti 3/2 razvodnik – u nultom položaju a) zatvoren b) otvoren [3]



Sl. 4.22 3/2 razvodnik s polukuglom – prije i nakon aktiviranja [3]

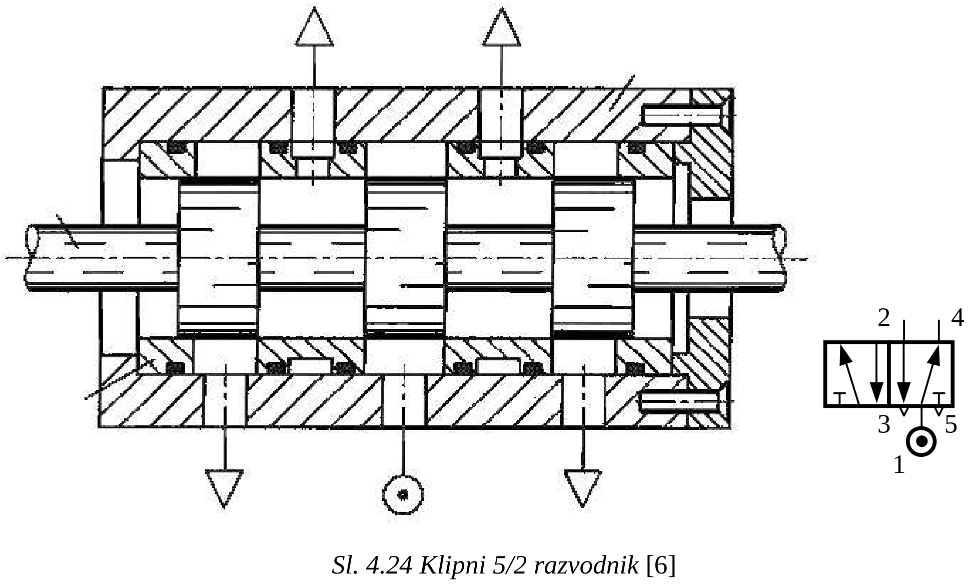
Zbog relativno velike sile aktiviranja, veći ventili često se izvode kao posredni (pred-upravljani - *Sl. 4.23*). Vanjskom silom aktivira se manji posredni (predupravljački odn. pilot) ventil koji propušta stlačeni zrak na klip glavnog razvodnika, kojeg prema tome pokreće sila stlačenog zraka.



Sl. 4.23 Tanjurasti 3/2 razvodnik s kotačićem – posredni [3]

Otvaranje / zatvaranje *razvodnika s kliznim prekrivanjem* ostvaruje se pomoću površine (klip, ploča ili klizač – kulisa) koja klizanjem prelazi preko strujnog otvora i tako ga postupno otkriva / prekriva.

Prednosti *razvodnika s klipom* (*Sl. 4.24*) su manja sila aktiviranja, jednostavnije funkcioniranje i mogućnost promjene načina aktiviranja. Mane su mu veća duljina hoda, manja frekvencija prebacivanja i poteškoće s brtvljenjem. Brtvene površine osjetljive su na nečistoće (habanje). Izrađuju se kao 3/2 i 5/2 razvodnici.

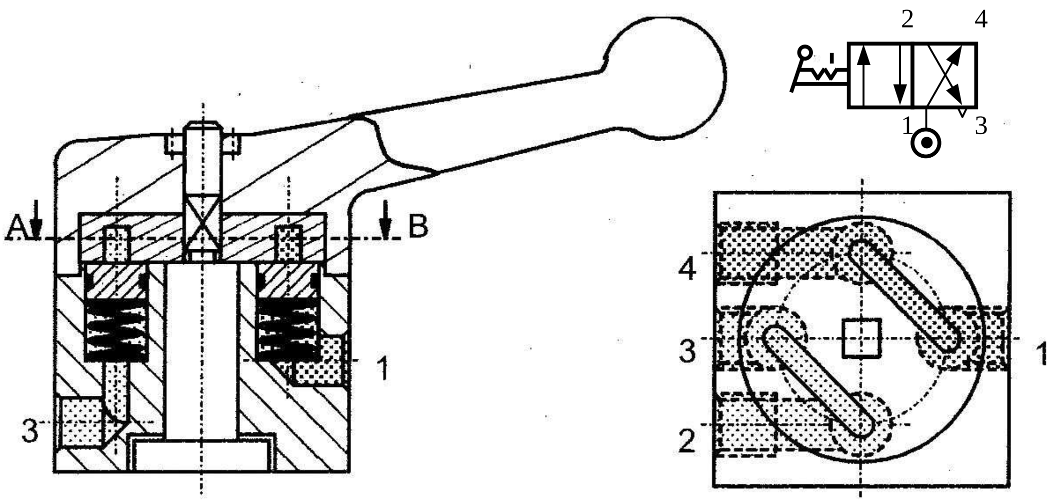


Sl. 4.24 Klipni 5/2 razvodnik [6]

Pločasti razvodnik (*Sl. 4.25*) ima kružnu razvodnu ploču, koja zakretanjem spaja odgovarajuće priključke. Aktiviranje je najčešće ručno. Može se iskoristiti i srednji

položaj, u kojem su svi priključci zatvoreni. Zato se izrađuje kao 4/2 i 4/3 razvodnik. Točno pozicioniranje ploče obično se osigurava uskočnikom (v. simbol aktiviranja).

Razvodnik s kulisom sliči klipnom razvodniku, ali umjesto središnjeg klipa klipnjača tangencijalno pomiče plosnatu razvodnu ploču (kulisu) koja klizanjem prekriva / otkriva otvore priključaka.



Sl. 4.25 Pločasti 4/2 razvodnik. Simbol: aktiviranje ručicom s uskočnikom [2]

Odabir razvodnika

Za odabir su bitne sljedeće tri, međusobno povezane, karakteristike cilindra (aktuatora):

- promjer klipa cilindra (radni volumen motora)
- opterećenje klipa
- potrebna brzina klipa (brzina vrtnje motora)

Odabir se vrši prema iskustvenim podacima – pomoću dijagrama.

Razvodnici trebaju imati jednoznačne oznake radi održavanja i dokumentacije.

4.2.2 Zaporni ventil

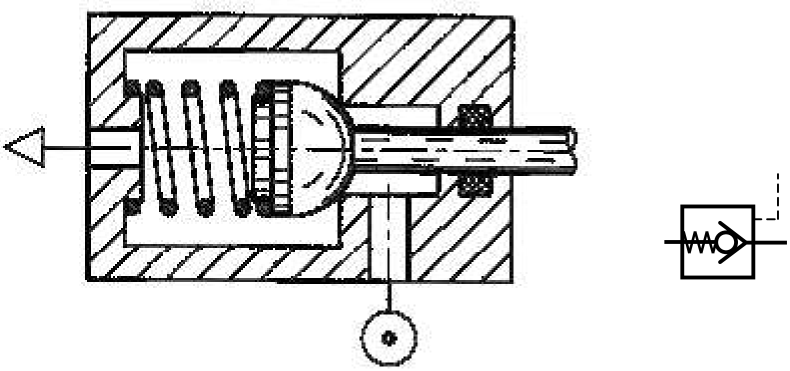
Zaporni ventili ne dopuštaju protok u jednom smjeru (zatvaraju), a propuštaju u suprotnom smjeru (kao dioda). Povećanje tlaka na izlaznoj strani potpomaže zapornu funkciju (brtvljenje).

Podjela:

- nepovratni
- uvjetno zaporni (logički I)
- naizmjenično zaporni (logički ILI)
- brzoispusni

Nepovratni ventil

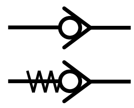
Potpuno zatvaraju protok u jednom smjeru, a u suprotnom propuštaju medij (*Sl. 4.26*) uz minimalno mogući pad tlaka (mali otpor). Taj pad tlaka je kriterij kvalitete ventila. Zatvaranje se postiže pomoću zapornih elemenata: ploča (tanjur), stožac, kugla. Nepovratni ventili često se kombiniraju s prigušnim ventilima.



Sl. 4.26 Nepovratni ventil s polukuglom i mogućnošću mehaničkog (prisilnog) otvaranja [6]

Dvije vrste zapornih ventila (i simbola):

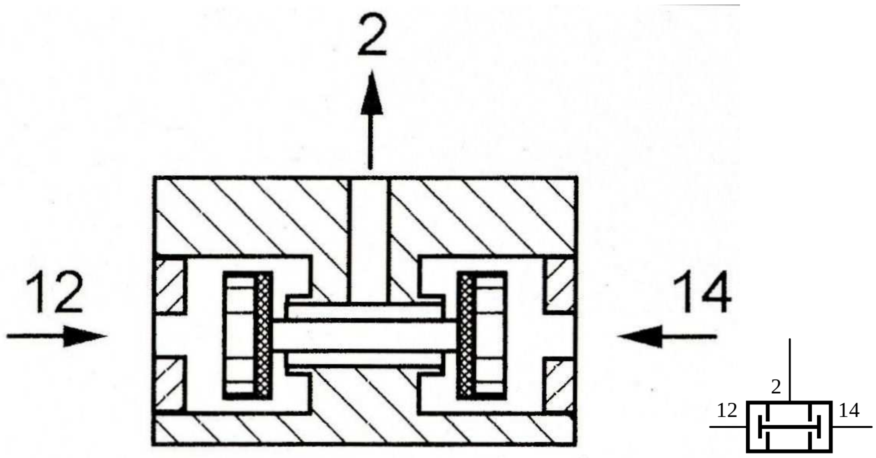
1. za zatvaranje potreban pad tlaka Δp na ventilu u nedozvoljenom smjeru
2. zatvara već kad izostane pad tlaka na ventilu.



Uvjetno zaporni ventil (I-ventil)

Uvjetno zaporni ventil (*Sl. 4.27*) ostvaruje logičku I-funkciju (v. tablicu). Ventil se zatvara (poput nepovratnog) ako tlak djeluje na bilo kojem ulaznom priključku, ali se ne može zatvoriti kad djeluje na oba. Ista funkcija može se ostvariti pomoću 3/2 razvodnika u pasivnom (*Sl. 4.28* a) ili serijskom spoju (b).

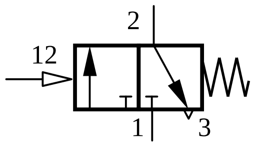
I-funkcija koristi se npr. pri upravljanju prešama (2 tastera za dvije ruke, da se izbjegnu ozljede ruku - *Sl. 4.29*). Tijekom izlaska klipnjače nije dozvoljeno otpustiti niti jedan razvodnik za start, inače se klipnjača odmah vraća u polazni položaj.



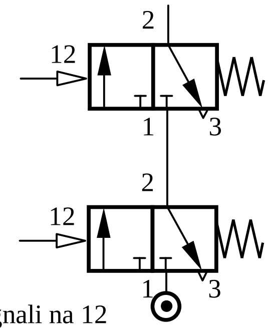
Sl. 4.27 Uvjetno zaporni (I) ventil [2]

Tablica 4.1 Funkcija I, ulazi: 12, 14, izlaz: 2

12	14	2
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

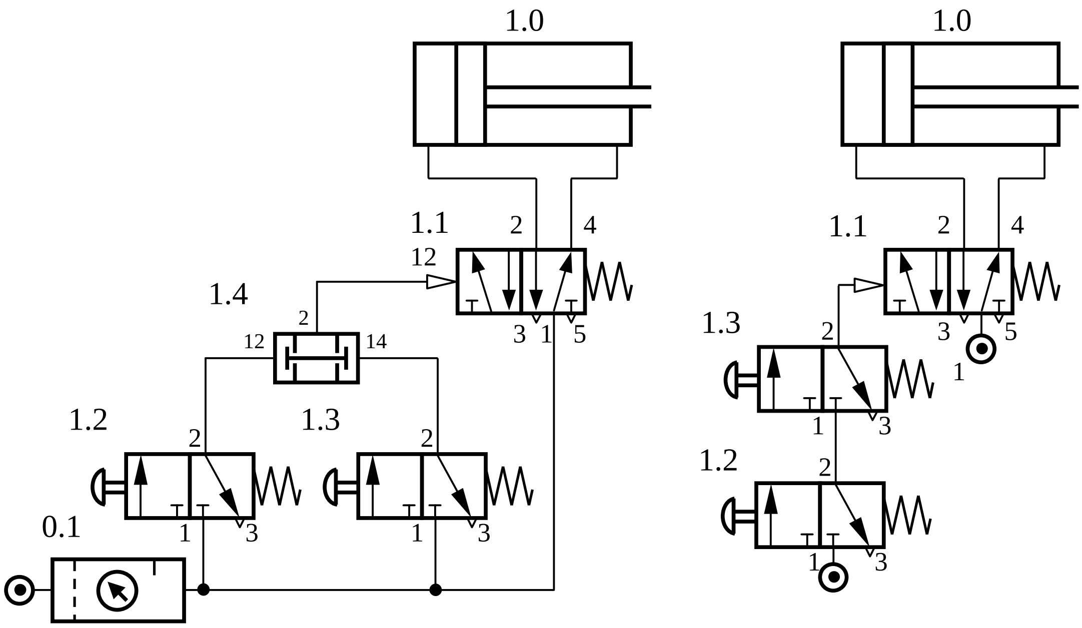


a) ulazni signali na 1 i 12



b) ulazni signali na 12

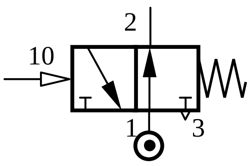
Sl. 4.28 Realizacija I-funkcije pomoću a) pasivnog spoja b) dva 3/2 razvodnika spojena u seriju



a) b)

Sl. 4.29 Primjena I-funkcije za upravljanje cilindrom pomoću a) I-ventila, b) serijskog spoja 3/2 razvodnika

Funkcija NE



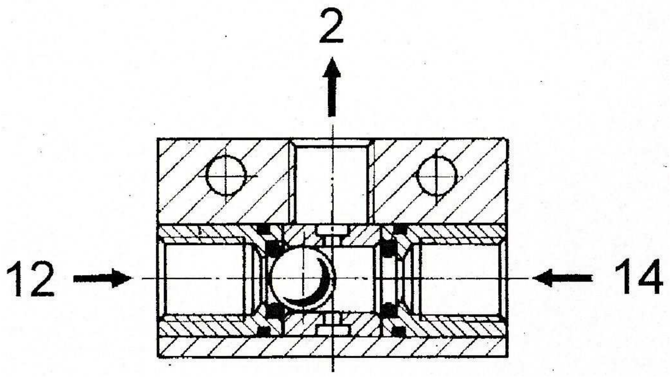
Realizacija NE-funkcije pomoću 3/2 razvodnika

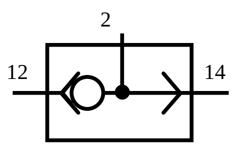
Tablica 4.2 Funkcija NE, ulaz: 10, izlaz: 2

10	2
0	1
1	0

Naizmjenično zaporni ventil (ILI-ventil)

Naizmjenično zaporni ventili (*Sl. 4.30*) ostvaruju logičku ILI funkciju (v. tablicu). Tlak se prenosi na izlazni priključak, kad tlak djeluje na jedan (bilo koji) ulazni priključak, a istovremeno se drugi (odzračeni) ulazni priključak zatvara. Ako tlak djeluje na oba ulazna priključka, otvoren je kroz jedan od njih (ili kroz oba) prolaz prema izlaznom priključku.





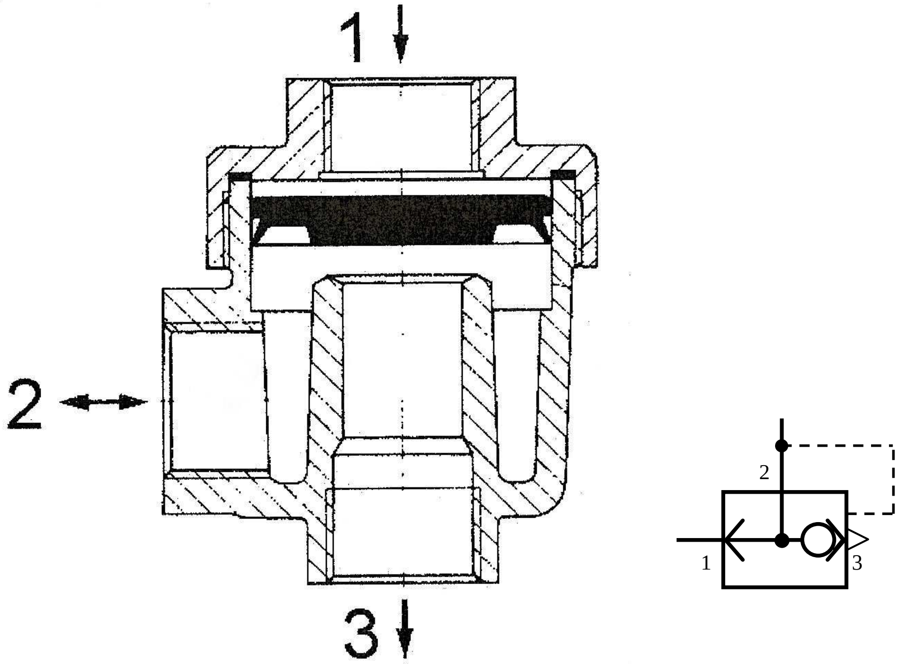
Sl. 4.30 Naizmjenično zaporni ventil [2]

Tablica 4.3 Funkcija ILI, ulazi: 12, 14, izlaz: 2

12	14	2
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Brzoispusni ventil

Brzoispusni ventili koriste se za ubrzanje pražnjenja cilindra, čime se povećava brzina kretanja klipa. Cilindar se ne prazni preko upravljačkog razvodnika, nego preko brzoispusnog ventila. Brzoispusni ventil ima relativno veliki protočni presjek i predstavlja manji otpor strujanju medija koji izlazi iz cilindra nego razvodnik. Također, u slučaju pražnjenja cilindra kroz razvodnik, na razvodniku se javlja buka zbog prigušivanja zraka. Prilikom punjenja cilindra zaporni element brzoispusnog ventila (*Sl. 4.31*) zatvara priključak 3 i svojim deformiranjem omogućava prolaz od 1 (razvodnik) prema 2 (cilindar). Prilikom pražnjenja zaporni element zatvara priključak 1 (onemogućava odzračivanje cilindra preko razvodnika), uz istovremeno otvaranje prolaza od 2 (cilindar) prema 3 (odzračni otvor).



Sl. 4.31 Brzoispusni ventil [2]

Primjer 1

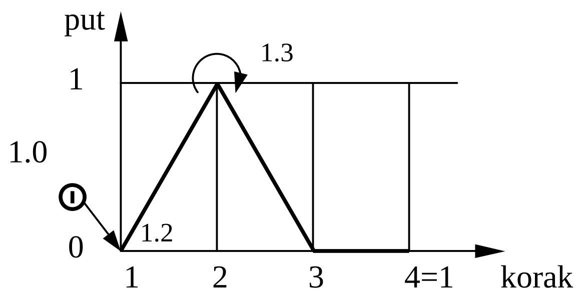
Klipnjača dvoradnog cilindra treba nakon signala za start izaći u krajnji položaj, pa se zatim automatski vratiti u početni položaj *Sl. 4.32*). Vraćanje u polazni položaj treba izvesti pomoću graničnog prekidača koji se aktivira u krajnjem položaju izvučene klipnjače. Brzinu klipa treba usporiti prigušivanjem. Tijekom izlaska klipnjače nije dozvoljeno otpustiti razvodnik za start, inače se klipnjača odmah vraća u polazni položaj.

Rješenje

Dijagram put-korak simbolički prikazuje kretanje klipnjače između uvučenog (0) i izvučenog (1) položaja. Jedan korak predstavlja jedno uvlačenje/izvlačenje jedne od klipnjači.

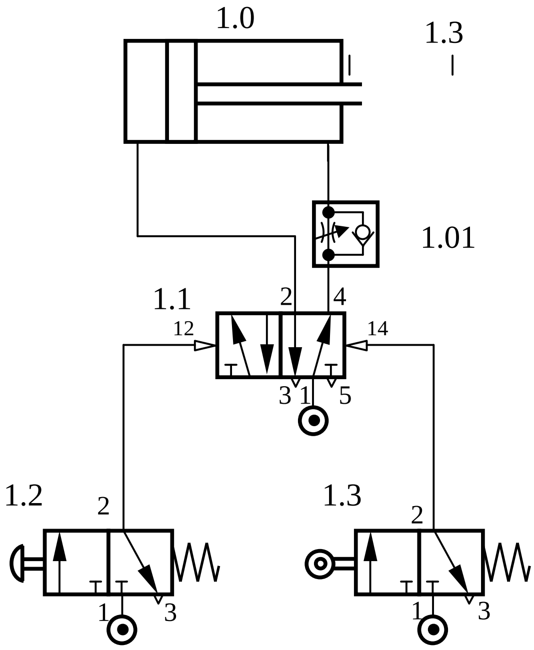
Oznaka tastera za start: (I)

Startni razvodnik nosi oznaku 1.2, razvodnik s graničnim ticalom 1.3.



Sl. 4.32 Dijagram put-korak

Prigušno-nepovratni ventil bolje je postaviti u povratnu granu (v. Protočni ventili). Tijekom izlaska klipnjače nije dozvoljeno otpustiti niti jedan razvodnik za start, inače se klipnjača odmah vraća u polazni položaj.



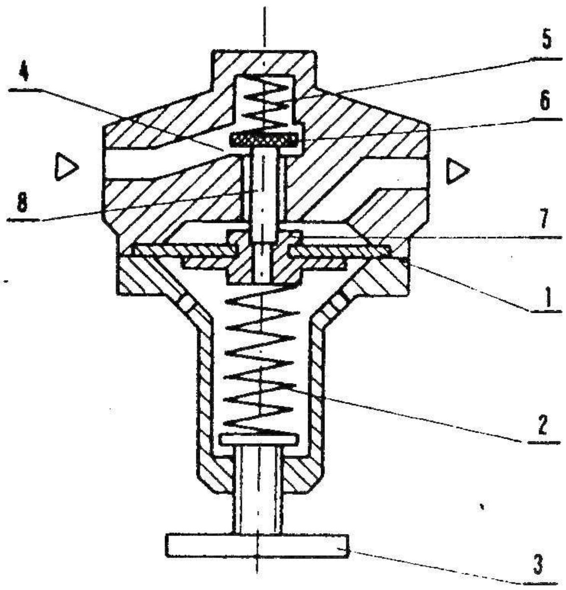
Sl. 4.33 Pneumatska shema upravljanja

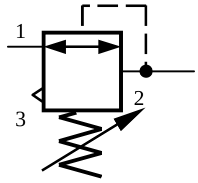
4.2.3 Tlačni ventil

Tlačni ventili koriste se za regulaciju tlaka radnog fluida, kao i za niz drugih funkcija baziranih na razini tlaka. Tlačni ventili dijele se na:

- regulatori tlaka
- sigurnosni ventili
- proslijedni tlačni ventili

Regulator tlaka (ventil za regulaciju tlaka)





Podesivi regulator tlaka s odzračivanjem

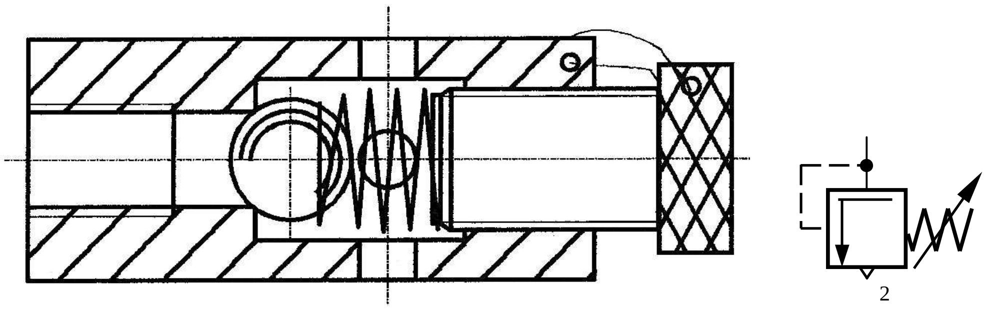
Sl. 4.34 Regulator tlaka [5]*: 1 – membrana, 2 – opruga, 3 – vijak, 4 – ulazni tlak, 5 – opruga, 6 – pladanj ventila, 7 – otvor za atm. zrak, 8 – vreteno ventila*

Dva su osnovna tipa regulatora tlaka:

- regulator bez korekcije prekoračenja tlaka u odvodnom kanalu (podesivi regulator tlaka bez ispusta)
- regulator s korekcijom prekoračenja tlaka u odvodnom kanalu (podesivi regulator tlaka s ispustom - *Sl. 4.34*)

Sigurnosni ventil

Sigurnosni ventili (ventili za ograničenje tlaka) osiguravaju da ne dođe do prekoračenja tlaka u dovodnom vodu. Ako tlak u dovodnom vodu poraste iznad namještene vrijednosti, dovod se spaja s odzračnim odvodom sve dok tlak ne padne ispod namještene vrijednosti.



Sl. 4.35 Sigurnosni ventil [2]

Proslijedni tlačni ventili

Konstrukcija ventila ista je kao kod sigurnosnih ventila, ali je namjena različita. Na njima je izlaz (prema drugim uređajima) otvoren samo dok je tlak na ulazu veći od namještene vrijednosti (prosljeđuju dalje povišeni tlak, ako je veći od namještenog).

4.2.4 Protočni ventili

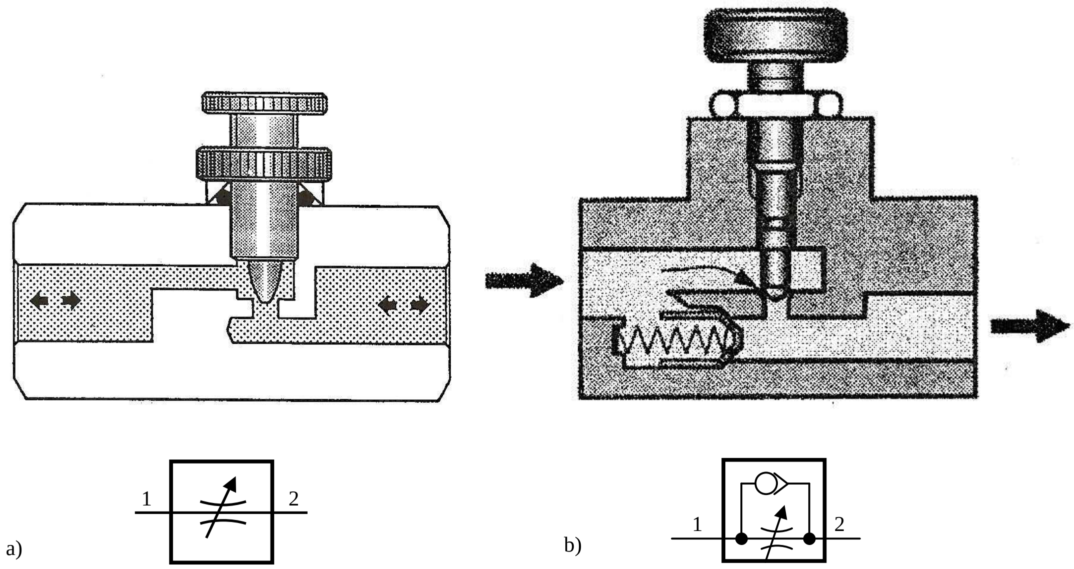
Protočni ventili djeluju na protok radnog fluida, a posredno i druge veličine koje zavise od protoka odn. brzine fluida. Koriste se dva tipa protočnih ventila:

- prigušni (prigušuju u oba smjera) i
- jednosmjerno-prigušni (prigušuju u jednom smjeru)

Prigušno djelovanje ostvaruje se suženjem (prigušnica, blenda) koje predstavlja otpor strujanju fluida (izaziva pad tlaka). *Jednosmjerno prigušni* ventili nazivaju se još *nepovratno-prigušni* i *prigušno-nepovratni*. Oni predstavljaju paralelni spoj prigušnice i nepovratnog ventila. U jednom smjeru protok ide kroz prigušnicu, dok se u suprotnom smjeru otvara nepovratni ventil, pa protok najvećim dijelom prolazi kroz njega uz minimalni otpor.

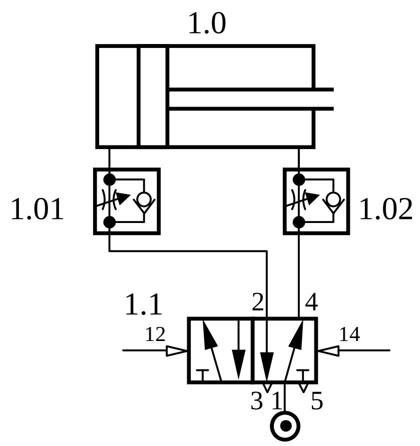
Prigušno-nepovratni ventili često se koriste za smanjenje brzine cilindra. Osim za male cilindre, obično se prigušuje odvod dvoradnih cilindara. *Sl. 4.37* prikazuje izvedbu usporenja hoda cilindra u oba smjera, prigušivanjem na odvodu. 5/2 razvodnik pruža mogućnost da se isti učinak postigne ugradnjom običnih prigušnih ventila na odzračne priključke 3 i 5. Ako se prigušno-nepovratnim ventilima na slici zamijene priključci (promjena smjera propuštanja nepovratnog ventila), postiže se

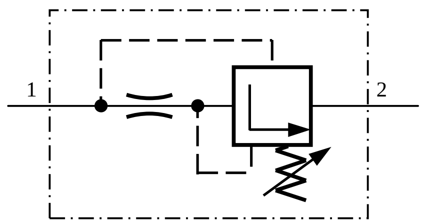
prigušivanje na dovodu. Samo jedan običan prigušni ventil ugrađen na bilo koji priključak cilindra vrši usporavanje u oba smjera, ali u jednom smjeru prigušuje odvod, a u drugome dovod.



Sl. 4.36 a) prigušni ventil [1] *b) jednosmjerno-prigušni ventil* [3]

Sl. 4.38 prikazuje izvedbu regulatora tlaka izvedenog pomoću prigušnice i regulatora diferencijalnog tlaka (regulatora razlike tlaka).





Sl. 4.37 Shema – cilindar s usporavanjem hoda u oba smjera

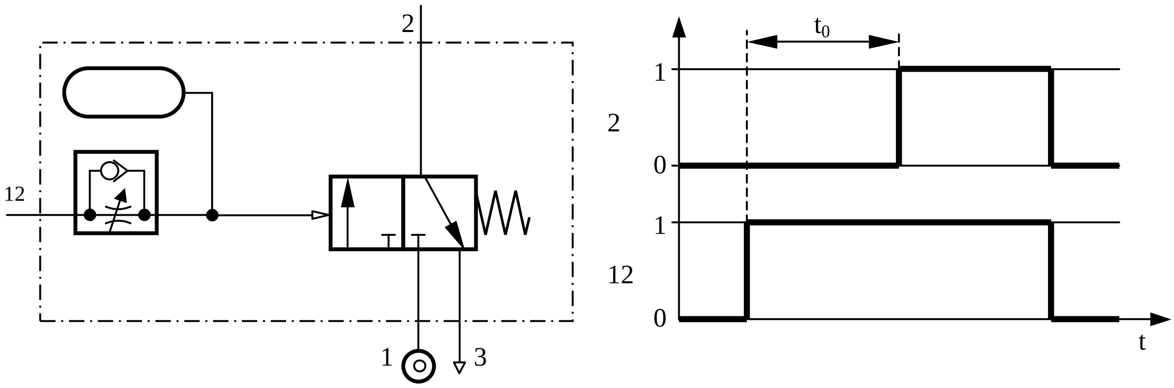
Sl. 4.38 Regulator tlaka – prigušnica + regulator diferencijalnog tlaka

4.2.5 Kombinirani ventili

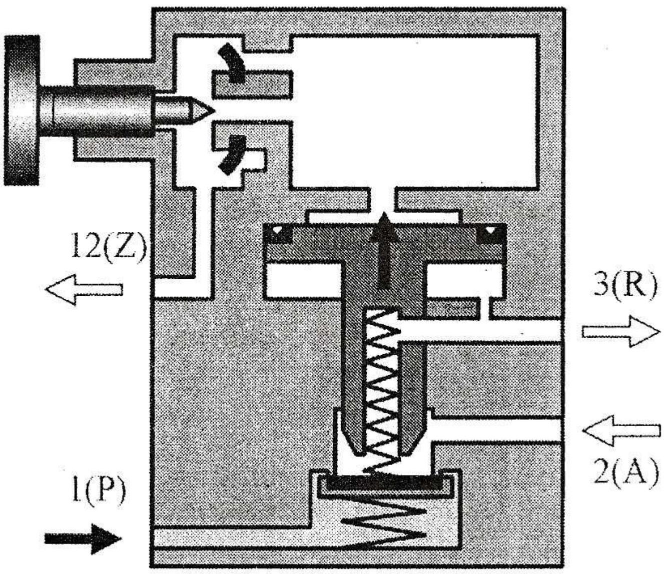
Realiziraju se sastavljanjem elemenata (ventila) iz nekoliko navedenih grupa ventila. Primjeri kombiniranih ventila:

- vremenski član (ostvaruje kašnjenje signala)
- razvodnik s minimalnim tlakom za aktiviranje (proslijedni v. + 3/2 razvodnik)
- davač takta
- pneumatska memorija
- elementi taktnog lanca

Vremenski član. Element kojim se ostvaruje vremensko kašnjenje provodi tlačni signal kroz prigušnicu, iza koje je paralelno priključen zračni spremnik (*Sl. 4.39*), što je analogno električkom spoju otpornika i kondenzatora. Dovođenjem stlačenog zraka na priključak 12, zrak preko prigušnice puni spremnik u kojem postupno raste tlak. Potrebno je izvjesno vrijeme kašnjenja (t_0) da tlak naraste na razinu dovoljnu za svladavanje sile opruge i prebacivanje razvodnika u aktivan položaj. Napajanje na većoj energetskoj razini vrši se posredno, preko razvodnika (spajanje od 1 na 2), a ne od priključka 12 preko prigušnice (otpora). Moguća izvedba vremenskog člana prikazana je na *Sl. 4.40*. Uobičajene izvedbe omogućuju kašnjenje od 0,5÷30 s.



Sl. 4.39 Vremenski član (kao kondenzator i otpor) - shema i odziv (vremensko kašnjenje: t_0)



Sl. 4.40 Vremenski član [3]

4.2.6 Cijevni zatvarači

Cijevni zatvarači su ventili i slavine čija svrha je potpuno, statičko zatvaranje cjevovoda, npr. prilikom isključivanja dijela sustava, pri zahvatima održavanja, remontu itd.

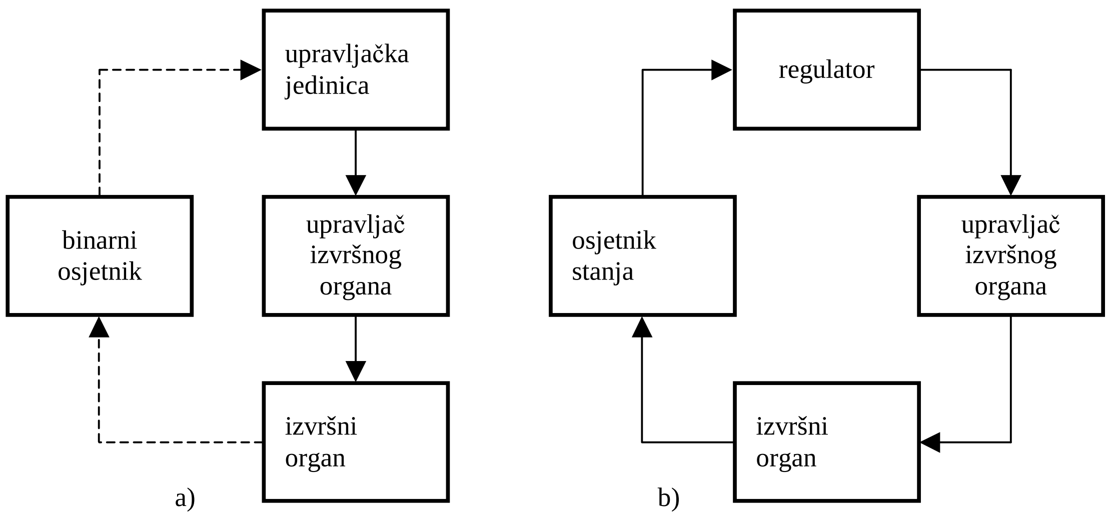
4.3 Pomoćni elementi

- priključne i montažne ploče,
- prigušivači buke (iz poroznih materijala),
- vakuumski uređaji za prihvat,
- indikatori,
- brojači,
- pretvarači signala,
- pneumatska pojačala,
- pneumatski bezkontaktni senzori

5 PNEUMATSKO UPRAVLJANJE (UPRAVLJAČKI DIO)

Upravljanje i regulacija

Za razliku od upravljačkog lanca (*Sl. 5.1 a)*, regulacijski krug (*b*) redovito sadrži negativnu povratnu vezu, koja nije prisutna u upravljačkom lancu. Tipičan zadatak regulacije je održavanje nekog parametra (npr. tlak, protok) na zadanoj razini, pa je unutar povratne veze potreban osjetnik stanja koji registrira razinu tog parametra. Tipičan zadatak upravljačkog lanca je izvršenje niza operacija. Pri tome je prije početka naredne operacije često potrebna povratna informacija o završetku prethodne. Takvu informaciju daje osjetnik binarnog tipa. Dok se u regulaciji pretežno koriste analogni signali (razina), u upravljanju se pretežno koriste binarni (digitalni) signali.



Sl. 5.1 Upravljački lanac (a) i regulacijski krug (b)

Pneumatski upravljački sustav

Pneumatski upravljački sustav može se podijeliti na dva dijela:

– informacijski (upravljački dio) – napajanje 6-8 bar ili manje
– energetski (izvršni dio) – napajanje 6-8 bar

Isti tip upravljačkih elemenata (ventili) pojavljuje se u dvostrukoj ulozi. Jednom su dio pneumatskog upravljačkog (informacijskog) sustava, gdje primaju i obrađuju informacije (signale), te konačno šalju naredbe (signale) izvršnim članovima. U drugoj ulozi oni predstavljaju dio energetskog sustava – upravljaju energetskim tokovima koji pokreću motor ili cilindar, tj. djeluju kao upravljač izvršnog organa (glavni razvodnik - pojačalo). Informacijski dio upravljačkog sustava danas se najčešće izvodi elektronički (elektropneumatičko upravljanje).

Podjela osnovnih oblika upravljanja prema načinu upravljanja cilindrom:

– upravljanje zavisno od volje operatera (npr. tipkalo)
– upravljanje zavisno od puta (npr. prekidač s kotačićem)
– upravljanje zavisno od vremena (vremenski ventili i kašnjenje)
– upravljanje zavisno od tlaka (tlačni ventili)
  a) pozitivno (porastom tlaka)
  b) negativno (padom tlaka)
– kombinacija prethodnih

Prema načinu odvijanja programa (programsko upravljanje):

- **slijedno** (koračno) upravljanje (sljedeća radnja odvija se nakon završetka prethodne)
- upravljanje **zavisno od vremena** (prema vremenskom programu – programator)

Upravljačke sheme

Pneumatske upravljačke sheme su funkcionalne sheme – prikazuju način funkcioniranja sustava i veze među elementima, a ne njihov fizički smještaj. Tako se npr. cilindri i razvodnici uvijek prikazuju u horizontalnom položaju. U shemama su jasno određeni i prepoznatljivi vrste i tipovi korištenih pneumatskih elemenata.

U upravljačkim shemama smještaju se (crtaju) **odozgo prema dolje** grupe pneumatskih elemenata poštujući sljedeći redoslijed:

- izvršni elementi (cilindri, motori)
- dodatni elementi (npr. prigušnice za usporavanje)
- energetski upravljački elementi (glavni razvodnici)
- informacijski upravljački elementi (za obradu signala – razvodnici, ventili)
- signalni elementi (tasteri, prekidači)
- elementi za pripremu i razvod zraka

Oznaka pneumatskog elementa upisuje se pokraj ili iznad elementa. Ukoliko se razvodnik aktivira pomakom klipnjače cilindra, oznaka tog razvodnika *dodatno* se upisuje pokraj klipnjače – iznad kratke vertikalne crtice koja označava položaj klipnjače u kojem se aktiviranje vrši.

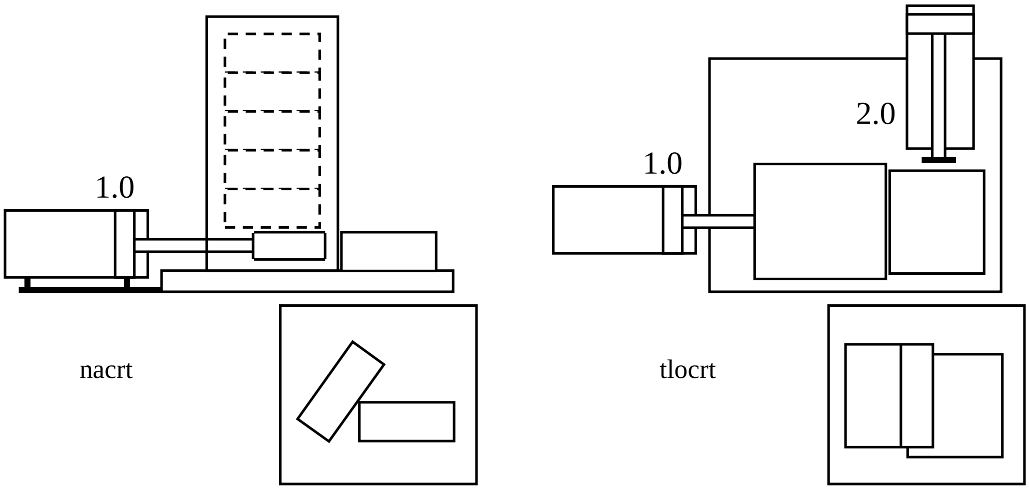
Pneumatski elementi povezuju se *vodovima*. Upravljački vodovi danas se najčešće crtaju punom linijom, iako su važećom normom predviđene crtkane linije.

Metode rješavanja (sinteze) pneumatskih shema upravljanja:

Projektiranje pneumatskog upravljanja potrebno je izvesti sustavnim redoslijedom. Cilindri i važniji elementi odabiru se sukladno radnom procesu. Zatim se nacrta *položajna skica* u koju se ucrtaju svi cilindri, pomični i relevantni dijelovi. Nakon toga potrebno je prikazati odvijanje radnog procesa putem *funkcijske sheme*, dijagrama (*dijagram put-vrijeme ili put-korak*) i/ili *slovno-brojčanim* načinom prikazivanja. Na kraju se korištenjem odgovarajućih metoda projektira *shema upravljanja*.

Sl. 5.2 prikazuje primjer položajne skice: izvlačenjem klipnjače cilindar 1.0 izbacuje predmet iz spremnika. Nakon toga cilindar 2.0 izvlačenjem klipnjače gurne taj predmet u kutiju. Na kraju se uvlače obje klipnjače, a novi predmet pada u pripremni položaj za izbacivanje.

Za projektiranje shema upravljanja koriste se *matematičke* i *inženjerske* metode. Matematičke metode koriste se za kompleksne probleme upravljanja. One se baziraju na kombinatorici i matematičkoj logici (Booleova algebra). Ovdje se obrađuju inženjerske metode, koje su prikladne za rješavanje jednostavnijih problema upravljanja.



Sl. 5.2 Primjer položajne skice

Između većeg broja inženjerskih metoda, ovdje se obrađuju sljedeće tri:

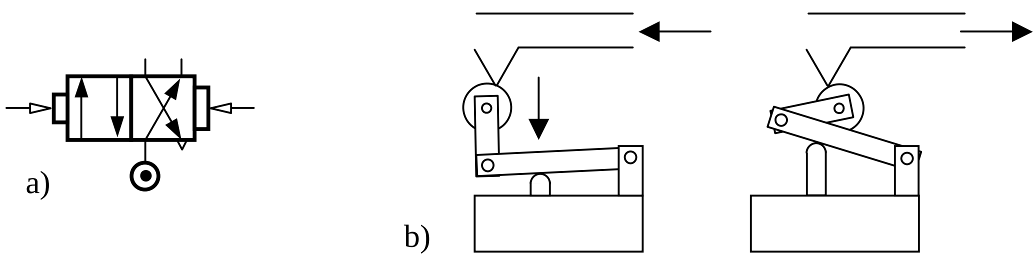
a) VDMA[1] metoda (Festo metoda)

b) kaskadna metoda

c) taktna metoda (korak-po-korak)

Osnovni problem kod upravljanja predstavlja *blokirajući* (prekrivajući) *signal*. To je signal koji drži razvodnik u jednom razvodnom položaju, pa time onemogućava promjenu položaja u času kada je ona potrebna u radnom procesu. Ovaj problem rješava se *potiskivanjem* (pošalje se jači signal – *Sl. 5.3*a) ili *poništavanjem* blokirajućeg signala. Za isključivanje nepoželjnog signala (poništavanje signala) koriste se:

1. Pneumatski elementi koji prilikom aktiviranja daju samo kratkotrajni signal na izlazu (*funkcijsko načelo* – VDMA metoda). Takav element je npr. razvodnik sa zglobnim ticalom i kotačićem preko kojeg prelazi šiljak postavljen na klipnjaču (*Sl. 5.3*b). Prelaskom šiljka u jednom smjeru preko kotačića generira se kratkotrajni signal, dok u suprotnom smjeru signala nema – savije se zglob koji nosi kotačić.



Sl. 5.3 a) potiskivanje – razvodnik aktiviran putem cilindara različite površine b) zglobno ticalo

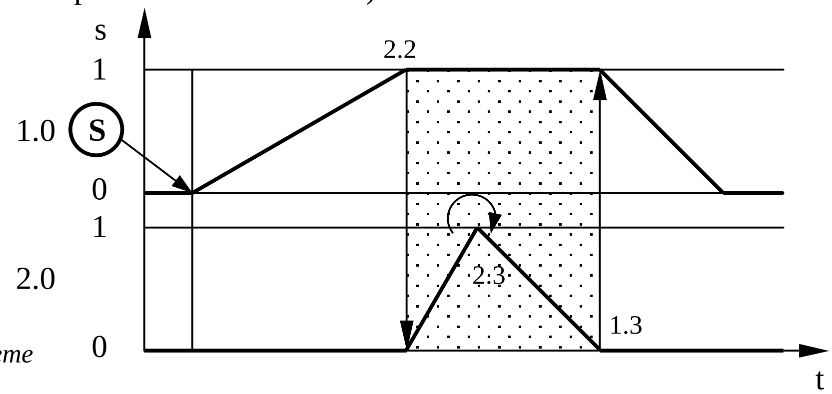
2. Kaskadni razvodnici koji se uključuju segmentno (kaskadno) – uključuju grupu po grupu graničnih razvodnika-prekidača (koristi se I-funkcija), u skladu sa slijedom odvijanja programa (kaskadna metoda)

---

[1] VDMA – Verein Deutscher Maschinenbau Anstalten (Savez njemačkih zavoda za strojogradnju)

3. Takvo povezivanje pneumatskih elemenata da se redoslijedom uključuje odn. omogućava samo izlaz za odgovarajući (jedan) korak, dok su ostali izlazi isključeni (korak-po-korak, taktna metoda). Ovo je jedina sveobuhvatna metoda.

Primjer 2 [1] (riješit će se pomoću sve tri metode)



Sl. 5.4 Dijagram put-vrijeme

Zadatak (presa za zakivanje) je definiran dijagramom put-vrijeme prikazanim na *Sl. 5.4*. Na dijagramu je prikazan upravljački slijed za cilindre 1.0 (pritezanje radnog komada) i 2.0 (zakivanje).

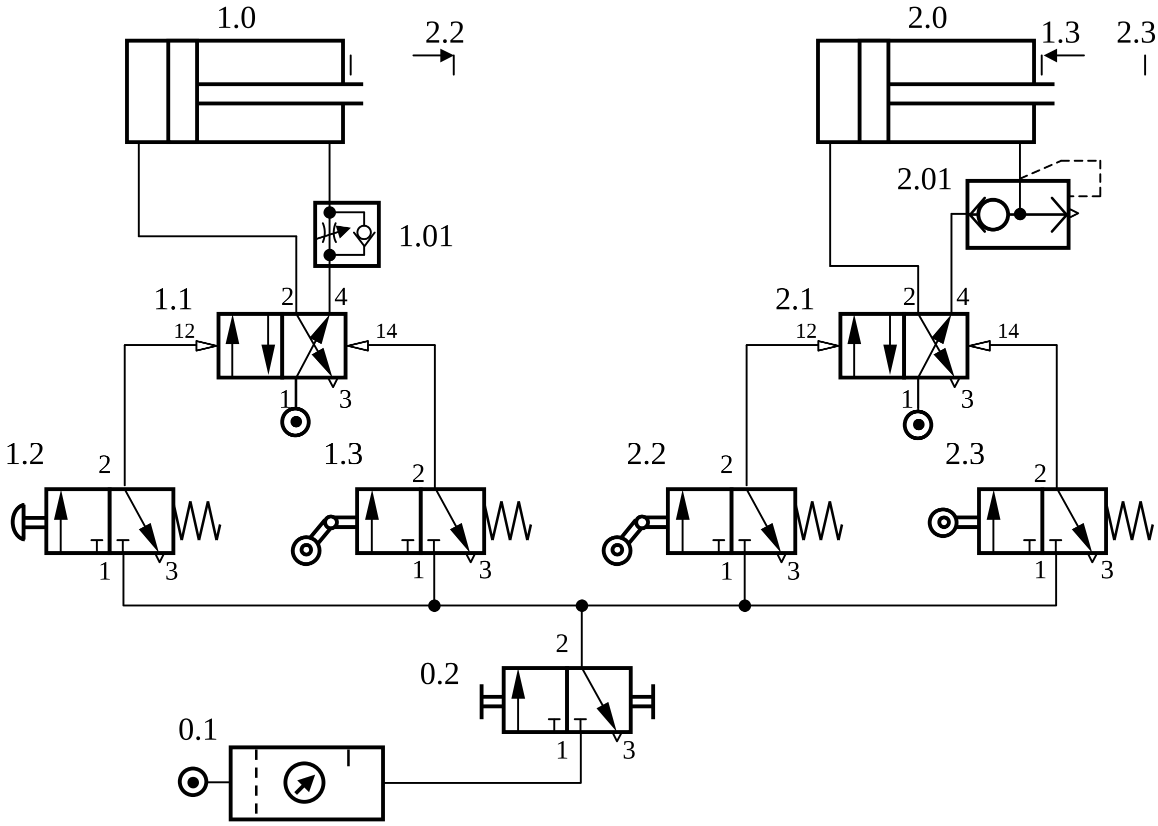
5.1 VDMA metoda

VDMA metoda koristi *dijagram put-vrijeme*. Dijagram se sastoji od grafičkog prikaza kretanja pojedinog cilindra (0 označava uvučenu klipnjaču, 1 izvučenu). Za svaki cilindar crta se po jedan graf, ti grafovi smještaju se jedan iznad drugog. Vremenska koordinata zajednička je za sve grafove odn. cilindre. Oznake razvodnika koji daju naredbu za pomak cilindra upisuju se na mjesto u dijagramu na kojem se aktiviraju. Od tog mjesta povlači se vertikalna strelica do cilindra kojem aktivirani razvodnik daje naredbu za pomak. Kružna strelica označava da cilindar preko razvodnika djeluje na samog sebe (razvodnik djeluje na isti cilindar koji ga je aktivirao). Posebno se označava signal za START (S ili dvije vertikalne crte). Kretanje klipa normalnom brzinom označava se pravcem nagnutim pod kutom 45^0, ubrzano kretanje cilindra (brzoispusni ventil) pod kutom 60^0, a usporeno kretanje (prigušno-nepovratni ventil) pod kutom od 30^0.

Obilježavanje pneumatskih elemenata. Pneumatski elementi u shemama se označavaju pomoću dva broja *x.y* (npr. 2.3). Prvi broj (*x*) označava cilindar, a drugi (*y*) se povećava prema razini u shemi (odozgo prema dolje). Prema tome, oznake cilindara mogu biti 1.0, 2.0 itd. Glavni razvodnik prvog cilindra označava se 1.1, drugog 2.1 itd. Upravljačko-signalni razvodnici koji daju signal za izvlačenje klipnjače označavaju se parnim *y* brojevima (npr. za prvi cilindar 1.2, 1.4 itd.), a oni koji daju signal za uvlačenje klipnjače neparnim (npr. za prvi cilindar 1.3, 1.5 itd.). Dodatni elementi (između cilindra i glavnog razvodnika) imaju ispred oznake y nulu (npr. za prvi cilindar 1.01). Elementi koji su zajednički za veći broj cilindara (npr. jedinica za pripremu zraka) dobiva nulu na mjestu oznake cilindra *x* (npr. 0.1).

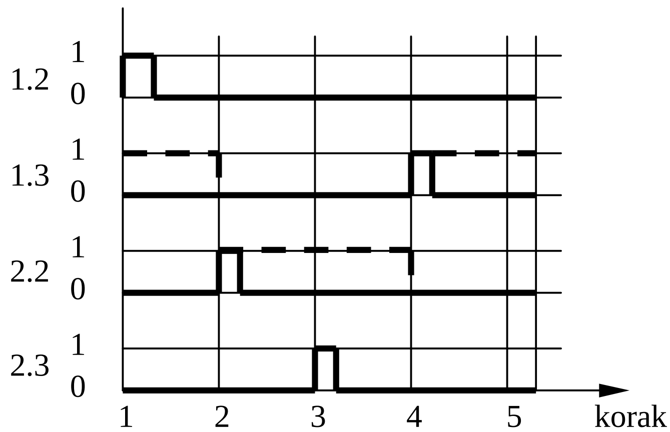
Pneumatska shema upravljanja i tijek signala na razvodnicima za primjer 2 prikazani su na *Sl. 5.5* i *Sl. 5.6*. Nakon signala START na razvodniku 1.2, klipnjača cilindra 1.0 izvlači se i aktivira razvodnik 2.2 (korak 1). Tada se izvlači klipnjača cilindra 2.0, aktivirajući razvodnik 2.3 (korak 2). Taj razvodnik treba preko razvodnika 2.1 vratiti cilindar 2.0 u početni položaj, čime se aktivira razvodnik 1.3 (korak 3). Time se i

cilindar 1.0 vraća u početni položaj (korak 4), čime je radni ciklus završen. Nakon skidanja zakovanog izratka i ulaganja novog, ponovni ciklus treba uslijediti ponavljanjem signala START.



Sl. 5.5 Primjer 2, pneumatska shema upravljanja

Ako se koriste razvodnici s graničnikom i ticalom (crtkana linija na *Sl. 5.6*), korak 3 ne može uslijediti, jer cijelo vrijeme djeluje *blokirajući signal* razvodnika 2.2, tako da razvodnik 2.3 ne može prebaciti razvodnik 2.1 u novi razvodni položaj. Osim toga, ciklus nije moguće ponovo započeti, jer signal razvodnika 1.3 blokira prebacivanje razvodnika 1.1 kod ponovljenog aktiviranja signala START.



Sl. 5.6 Tijek signala na razvodnicima

Da bi se izbjegli ovi problemi s blokiranjem signala, u rješenju pomoću VDMA metode (*Sl. 5.5* i puna linija na *Sl. 5.6*) koriste se razvodnici sa zglobnim kotačićem i ticalom (razvodnici 1.3 i 2.2) koji se mogu samo kratkotrajno aktivirati, i to prolaskom klipnjače samo u jednom smjeru. Na upravljačkoj shemi taj se smjer mora označiti strelicom uz oznaku graničnog položaja cilindra (v. *Sl. 5.5*).

U VDMA metodi, potrebno je u dijagramu put-vrijeme *detektirati* postojanje *blokirajućeg signala*. Promatraju se *horizontalne linije* u tom dijagramu. One znače da dotični cilindar miruje, a aktivirani razvodnik (ovdje 2.2) kroz to vrijeme mirovanja ostaje uključen. Ako se u tom razdoblju uključuje i drugi razvodnik, koji ima isti prvi broj (pripada istom cilindru), a njegov drugi broj ima suprotnu parnost (u ovom slučaju takav razvodnik je 2.3), prvi razvodnik (2.2) daje blokirajući signal.

5.2 Kaskadna metoda

Kod kaskadne metode obustavlja se napajanje (grupa) razvodnika kod kojih se pojavljuje blokirajući signal. Pravila projektiranja pneumatskog upravljanja pomoću kaskadne metode:

1. Ispisuje se *redoslijed odvijanja programa*, pri čemu se izvlačenje cilindra označava s '+', a uvlačenje s '-'.

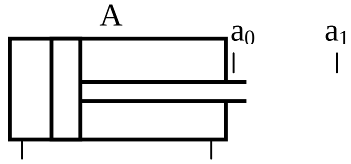
   Dakle, za **primjer 2** zapisuje se:

   A+ B+...B-...A-

   Ako se cilindri gibaju istovremeno, moraju se zapisati jedan ispod drugog. Za razliku od brojčane oznake cilindra (npr. 1.0) iz VDMA metode, u kaskadnoj i ostalim metodama cilindri se označavaju velikim slovima (npr. A).

2. Redoslijed odvijanja programa upisuje se oko kruga (*funkcijski krug*), u smjeru gibanja kazaljke na satu. Start se označava s dvije vertikalne linije (||), a strelicom se pokaže na odgovarajuće prvo – početno – kretanje cilindra.

3. Svaki cilindar (osim onih koji rade istovremeno) u hodu prema naprijed aktivira po jedan 3/2 razvodnik s ticalom ili kotačićem, a jedan u hodu prema natrag. Razvodnik se označava istim slovom kao i cilindar koji ga kretanjem aktivira, ali koriste se mala slova abecede. Ako se razvodnik aktivira uvlačenjem klipnjače dobiva indeks 0, a pri izvlačenju indeks 1 (npr. razvodnici koje aktivira cilindar A nose oznake a_1 i a_0).



   Iznad oznaka cilindara u krugu upisuje se odgovarajuća oznaka razvodnika (npr. a_1 iznad A+).

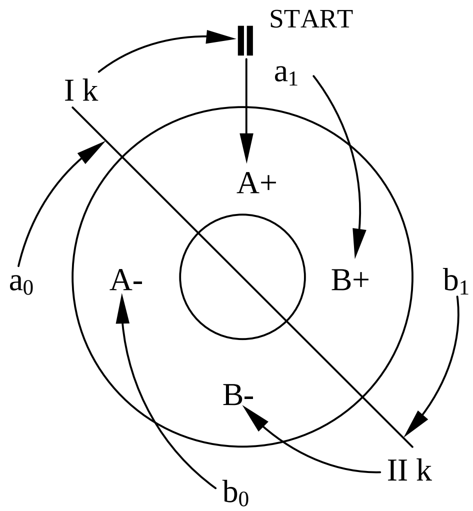
4. Krug se zatim razdijeli na isječke (zrakama iz centra) u kojima se jedan cilindar smije pojaviti samo jedan puta. Svaki isječak kruga predstavlja jednu kaskadu. Uz funkcijski krug označi se početak svake kaskade (npr Ik, IIk, itd.).

5. Svaki razvodnik unutar kaskade direktno uključuje gibanje klipnjače odgovarajućeg cilindra prema redoslijedu odvijanja. To se prikazuje povlačenjem strelica od razvodnika do odgovarajućih cilindara u funkcijskom krugu.
6. Posljednji razvodnik u kaskadi ne daje impuls za gibanje sljedećeg cilindra, već aktivira sljedeću kaskadu. To se u funkcijskom krugu označava strelicom od posljednjeg razvodnika prema početku nove kaskade. Istovremeno isključuje se prethodna kaskada odn. njeno napajanje.

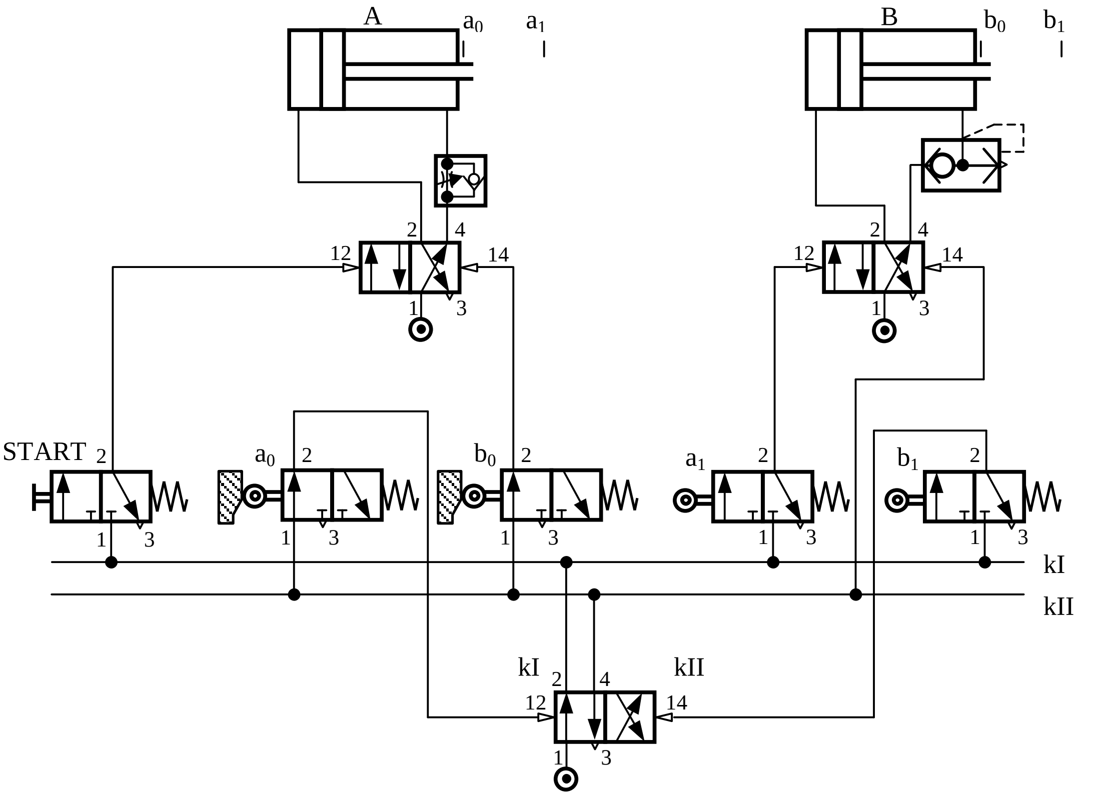
   Svaka kaskada upravlja se pomoću impulsno upravljanog 4/2 razvodnika (bistabila). Ti *kaskadni razvodnici* povezani su tako da je uvijek samo jedna kaskada aktivirana, dok su ostale isključene. Broj kaskadnih razvodnika uvijek je za jedan manji od broja kaskada.
7. Prvo aktiviranje kretanja cilindra u kaskadi vrši se kaskadnim razvodnikom. To se u funkcijskom krugu označava strelicom od početka kaskade prema cilindru koji slijedi prema redoslijedu odvijanja.
8. Svi razvodnici koje aktiviraju cilindri napajaju se preko kaskade (pasivna realizacija I-funkcije), a ne direktno. Napajanjem kaskada upravljaju kaskadni razvodnici.
9. Signal razvodnika koji se aktivira posljednji u cijelom ciklusu (to može biti granični ili kaskadni razvodnik) serijski se spaja (pasivni spoj) na razvodnik za start.

Funkcijski krug za **primjer 2** prikazan je na *Sl. 5.7*, a shema upravljanja na *Sl. 5.8*.

Primjer 2

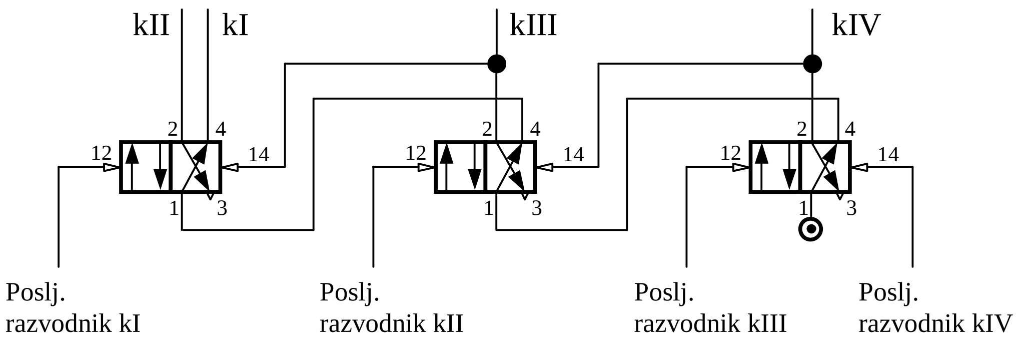


*Sl. 5.7 Primjer 2, funkcijski krug (*A+ B+...B-...A-)



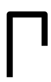
Sl. 5.8 Primjer 2, pneumatska shema upravljanja

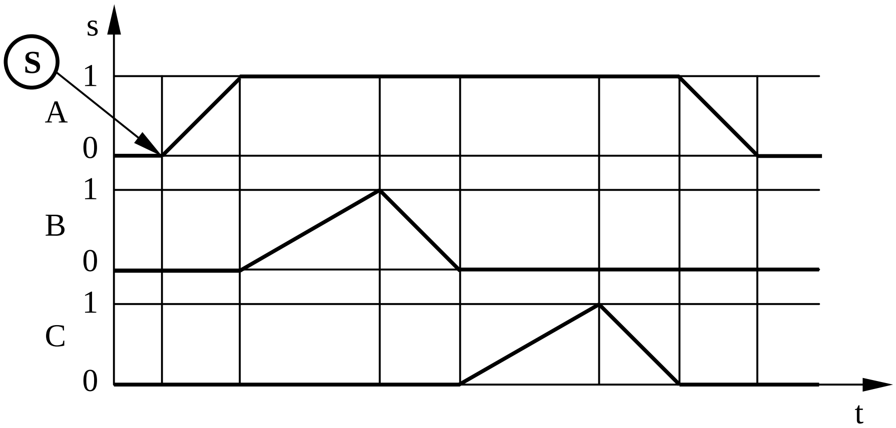
Dvije kaskade upravljaju se pomoću jednog kaskadnog razvodnika, a za svaku dodatnu kaskadu potreban je dodatni kaskadni razvodnik. Prilikom uključivanja treće i daljnjih kaskada potrebno je razvodnik prethodne kaskade prebaciti u početni položaj. Direktno se napaja samo posljednji kaskadni razvodnik, a za napajanje svih ostalih koristi se pasivni I-spoj.



Sl. 5.9 Primjer spajanja kaskadnih razvodnika za 4 kaskade

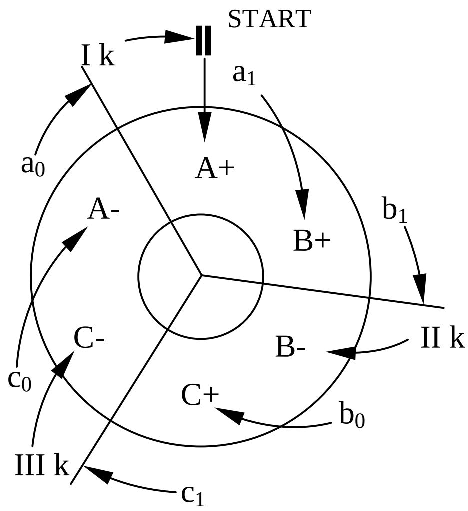
Primjer 3 [3]

U uređaj za savijanje lima ručno se umeće komad limene trake. Aktiviranjem tipke START započinje se ciklus u kojem se cilindrom A pridržava traka cijelo vrijeme izrade, savijanje za prvih 90^0 obavlja se alatom koji pokreće cilindar B i koji se mora vratiti u početni položaj da ne ometa alat cilindra C kojim se vrši savijanje za narednih 90^0. Konačni oblik izratka: 



Sl. 5.10 Primjer 3, dijagram put-vrijeme

Redoslijed odvijanja programa je: **A+ B+...B- C+ C- A-**.



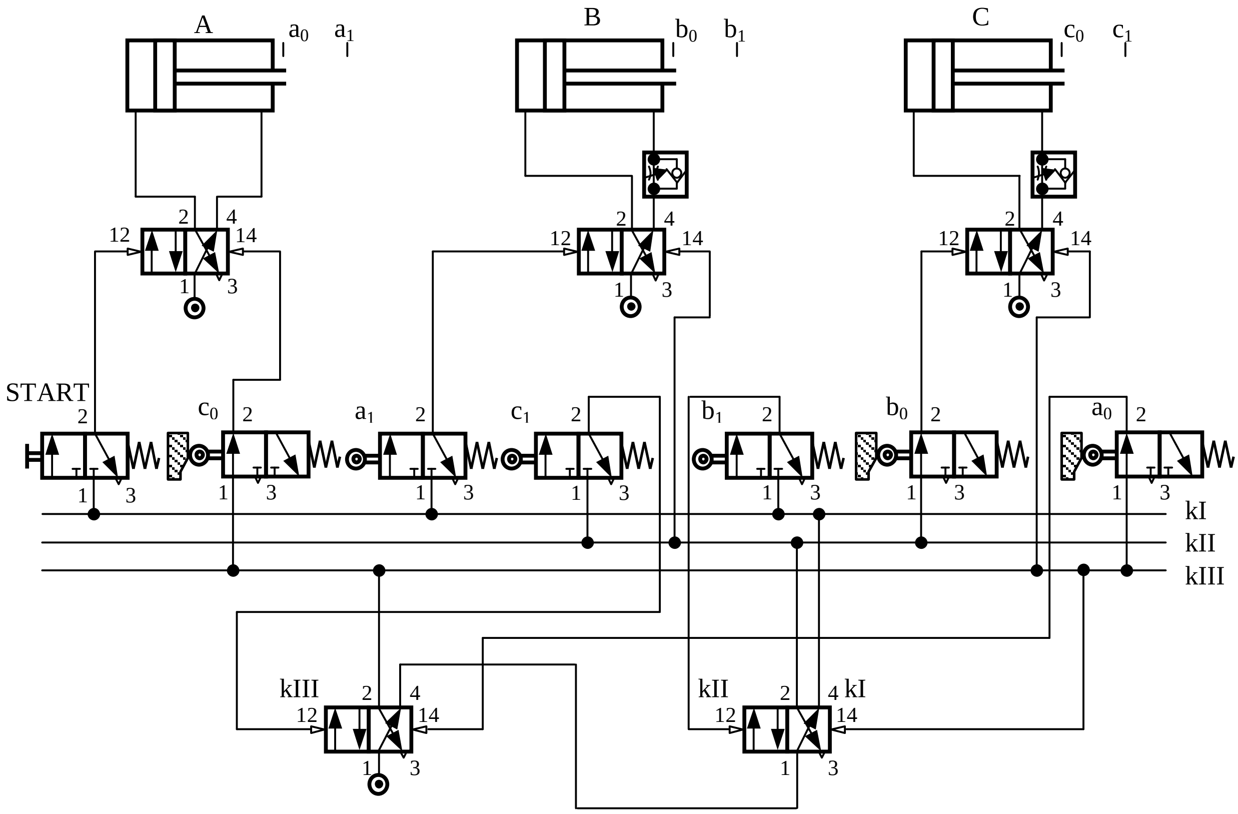
Sl. 5.11 Primjer 3, funkcijski krug

5.3 Taktna metoda

Taktna metoda spada u *koračne metode* i razvila se iz preostale dvije koračne metode: *metode korak-po-korak* i *metode sa 'sequenz-modulom'*. Te metode kao osnovni član koriste impulsno upravljane razvodnike (bistabile) kao memorijske elemente, a baziraju se na slijednom uključivanju svakog sljedećeg koraka prema zadanom programu uključivanja kojeg diktira radni proces. Pri tome se signal naredbe za pojedinu radnu akciju (npr. A_1, A_2, A_3 na *Sl. 5.13*) dozvoljava samo u času kad je taj signal potreban, čime se izbjegava blokirajući signal. Koračne metode zahtijevaju nešto veći broj pneumatskih elemenata, ali predstavljaju jednostavan i pouzdana način rješavanja složenijih situacija, a naročito su pogodne kad u jednom radnom ciklusu treba više puta ponavljati neke radnje (npr. kad se isti cilindar mora izvlačiti više puta u jednom ciklusu).

Sl. 5.13 uz pomoć logičkih simbola prikazuje *princip* rada *koračnih metoda* za primjer da je potrebno izvršiti tri akcije. Memorijski elementi imaju dva moguća stabilna položaja: aktivan S (set) i neaktivan R (reset). Npr. za signal A_2 (naredbu da se izvrši odgovarajuća radnja) mora se srednji memorijski element postaviti u aktivan položaj S, a za to je potreban signal srednjeg I-člana. Za taj signal potreban je signal Y_2 (da je

prethodni memorijski element u aktivnom položaju S – tj. A_1) i signal X_2 (signal odgovarajućeg osjetnika kojim se detektira da je prethodna naredba A_1 izvršena u potpunosti). Signal A_2 istovremeno je i signal Z_1 za deaktiviranje (prelazak u položaj R) prethodnog memorijskog elementa. Na taj način deaktivirani su svi elementi koji su aktivirani ranije (ako ih ima više), a odsustvo signala Y onemogućava ponovno aktiviranje u neželjenom času.

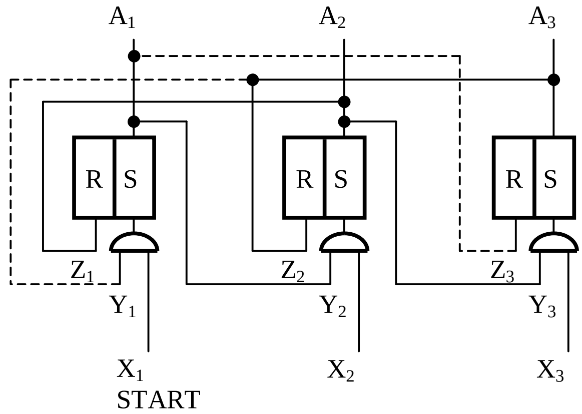


Sl. 5.12 Primjer 3, kaskadna metoda, pneumatska shema upravljanja

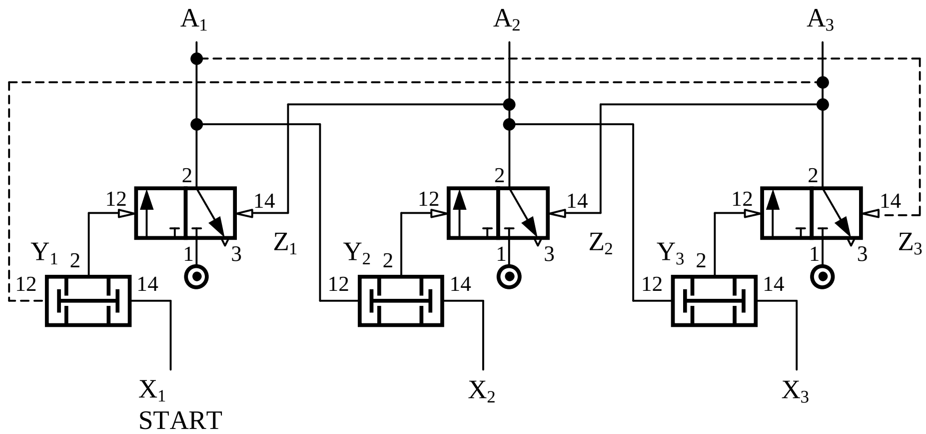
Treba uočiti da se svaki signal A ujedno dovodi na R stranu prethodnog memorijskog elementa (signal Z) i na I-član sljedećeg memorijskog elementa (signal Y). Kako se ovime ne bi izazvalo blokiranje susjednog memorijskog elementa, niz mora imati minimalno tri memorijska elementa (prethodni i sljedeći element ne smije biti jedan te isti). Cijeli ciklus zatvara se (crtkana linija) tako da se prvom akcijom (A_1) deaktivira posljednji memorijski element (Z_3), a signal Y_1 posljednje akcije (A_3) dovodi se na prvi I-član.

Budući da su potrebna minimalno tri memorijska elementa, shemu na *Sl. 5.13* moguće je koristiti i za slučaj kad su potrebne samo dvije akcije (A_1 i A_3). Tada treba zatvoriti radni priključak A_2 (slijepi priključak), a umjesto signala X_2 priključiti signal Y_2 (na oba priključka I-člana).

Ovakva logička shema direktno se implementira u metodi *korak-po-korak* [7] koja koristi impulsno aktivirane 3/2 razvodnike kao memorijske elemente i uvjetno zaporne ventile (I-ventile). *Sl. 5.14* prikazuje logički sklop sa *Sl. 5.13* realiziran pomoću tih elemenata.



Sl. 5.13 Princip koračnih metoda prikazan logičkim simbolima



Sl. 5.14 Temeljni sklop metode korak-po-korak

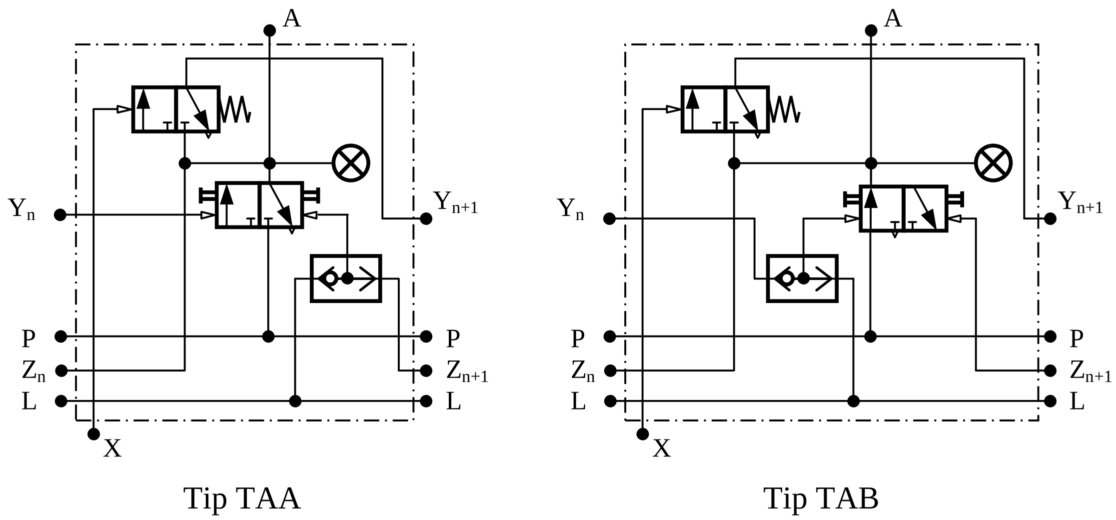
Taktna metoda koristi gotove upravljačke module, čime izvedba postaje jednostavnija i jeftinija, pa se metoda često koristi. U taktnim modulima I-član je riješen pomoću 3/2 razvodnika u tzv. pasivnom spoju. Moduli imaju i dodatni priključak za signal L kojim se može isključiti ili uključiti izlazni signal modula (A-signal). Korištenjem signala L moguće je memorijske elemente upravljačkog sustava prije starta dovesti u ispravan položaj (reset). Kombiniraju se tri tipa modula TAA, TAB i TAC. Taktni moduli TAA i TAB (*Sl. 5.15*) sadrže:

- impulsno aktivirani 5/2 razvodnik (memorijski član) sa zatvorenim jednim vodom koji se iz praktičnih razloga koristi umjesto 3/2 razvodnika,
- 3/2 razvodnik u pasivnom spoju (I-član koji – zbog tehnološkog rješenja i načina spajanja modula u upravljački lanac – pripada narednom koraku),
- naizmjenično zaporni ventil (ILI-član) koji omogućava uključivanje/isključivanje izlaznog (A) signala pomoću signala L.

Taktni moduli TAA i TAB razlikuju se po spajanju ILI-člana odn. signala L. Kod tipa TAA izlazni se signal (A) isključuje pomoću signala L, a kod tipa TAB, on se uključuje.

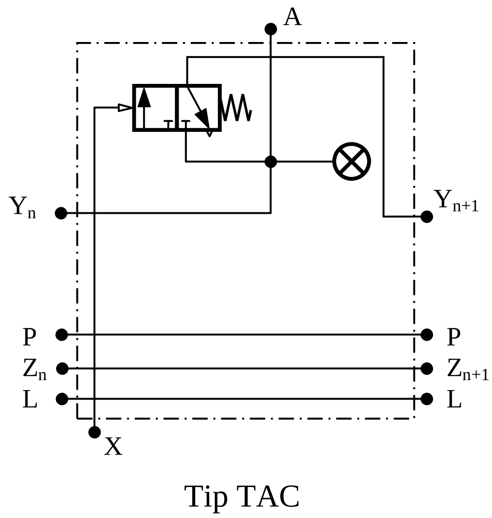
Signal X pripada narednom elementu. Putem pasivno spojenog (I) razvodnika signal X generira signal Y_{n+1}, što dovodi do aktiviranja (Set) memorijskog 3/2 razvodnika narednog elementa na kojem se generira signala A i Z_{n+1}, a time se napaja pasivni (I)

spoj za naredni korak i ujedno u prvotnom elementu deaktivira (Reset) memorijski razvodnik uz prestanak napajanja pasivnog (I) spoja.



Sl. 5.15 Taktni moduli tip TAA i TAB

Taktni modul TAC (*Sl. 5.16*) sadrži samo 3/2 razvodnik u pasivnom spoju (I-član).

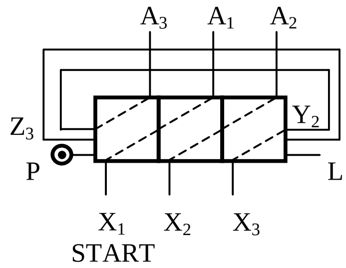


Sl. 5.16 Taktni modul tip TAC

U taktni lanac mogu se uključiti minimalno tri modula s memorijskim elementima. Moguća izvedba temeljnog sklopa sa *Sl. 5.13* pomoću taktnih modula prikazana je na *Sl. 5.17*. Ako se koristi signal L, prvi modul treba biti tip B (TAB), a preostala dva tip A (TAA). Napominje se da se ovdje za metodu korak-po-korak koriste taktni moduli, što nije uobičajeno i ne odgovara pravilima taktne metode. Ovo rješenje služi samo za pojašnjenje funkcioniranja taktnih modula, a taktna metoda i njena normalna primjena izložene su u nastavku.

U cilju pojednostavljenja rješenja odn. smanjenja broja memorijskih elemenata, taktna metoda preuzima princip iz 'skraćene' metode korak-po-korak koji se bazira na istoj ideji kao i kaskadna metoda. Najprije se redoslijed odvijanja programa zapisuje na već poznati način (ispisuje se redoslijed odvijanja programa). Taj zapis se zatim dijeli u

grupe u kojima se niti jedan cilindar ne smije pojaviti dva puta. Prvi korak u svakoj grupi ostvaruje se taktnim modulom tip A (TAA), dok se preostali koraci ostvaruju modulom tip C (TAC). Ako se koristi signal L, posljednji korak se ostvaruje modulom tip B (TAB).



Sl. 5.17 Temeljni sklop metode korak-po-korak pomoću taktnih modula

Primjer 2

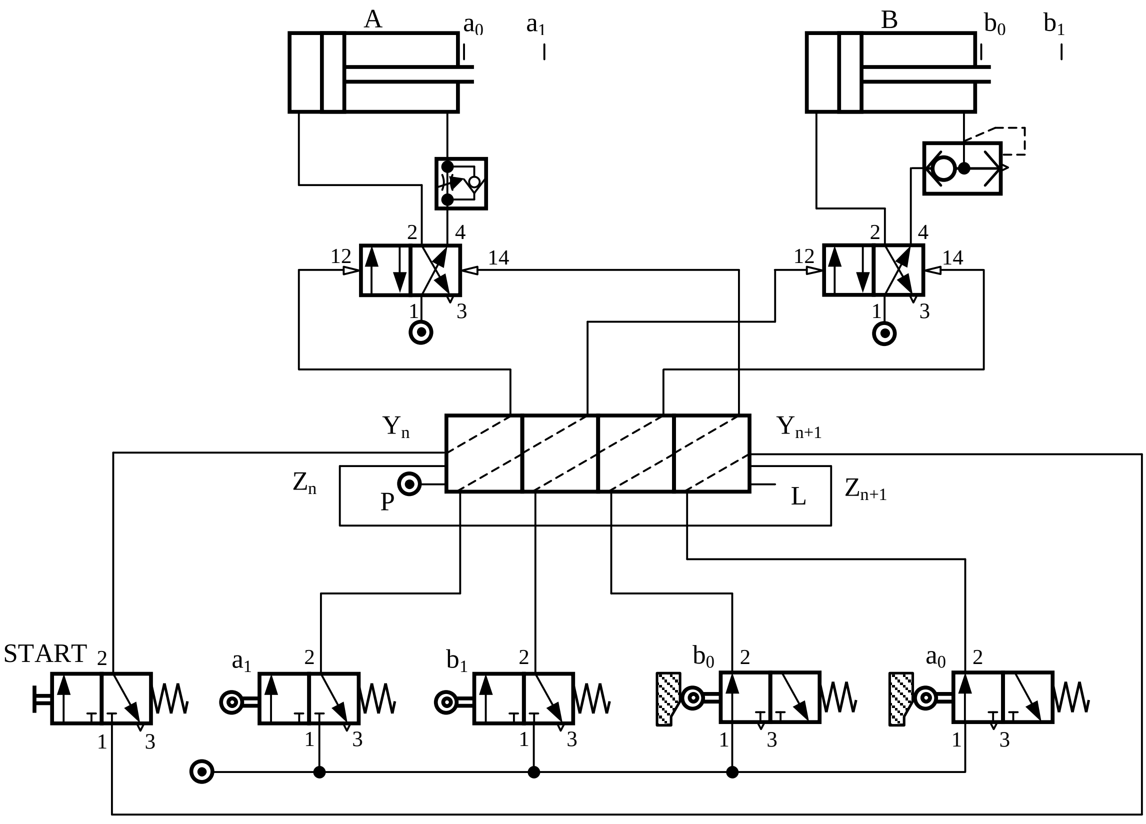
Redoslijed odvijanja programa:

A+ B+ B- A-

Shema upravljanja za primjer 2 izvedena taktnom metodom dana je na *Sl. 5.18*, a taktni moduli ugrađeni u upravljački lanac navedeni su u tablici.

Tablica 5.1 Redoslijed ugrađenih taktnih modula – prim. 2

Grupa	A+ B+	B- A-
Ugrađeni tipovi modula	A C	A B



Sl. 5.18 Primjer 2 – taktna metoda, shema pneumatskog upravljanja

Primjer 4 [2]

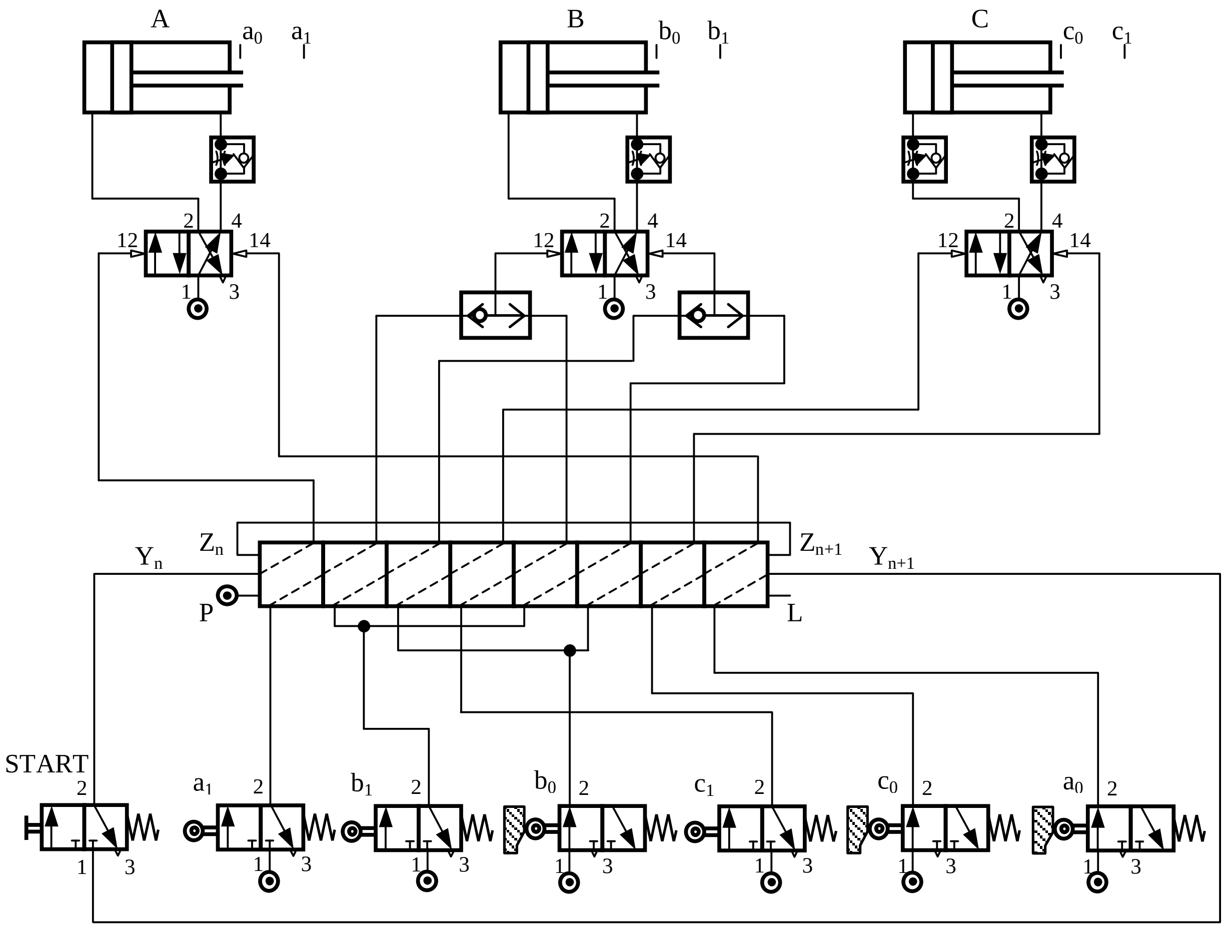
Uređaj za bušenje treba u izratku izbušiti dvije rupe. Najprije se cilindrom A izradak priteže uz odgovarajuće pozicioniranje, pa se pomoću cilindra B pomiče glava bušilice i na taj način izvrši bušenje, a zatim se glava vraća u početni položaj. Tada se cilindrom C cijeli pomični dio radnog stola na kojem su pričvršćeni izradak i cilindar A pomiče u novi položaj i bušenje se ponavlja pomoću cilindra B. Na kraju se taj dio radnog stola vraća u početni položaj i izradak otpušta. Potrebno je usporiti izvlačenje cilindara A i B, kao i kretanje radnog stola u oba smjera. U ovom primjeru se unutar ciklusa ponavlja rad cilindra B, što se najlakše rješava taktnom metodom.

Redoslijed odvijanja programa:

A+ B+ B- C+ B+ B- C- A-

Tablica 5.2 Redoslijed ugrađenih taktnih modula – prim. 4

Grupe	A+ B+	B- C+	B+	B- C- A-
Ugrađeni moduli – varijanta 1	A C	A C	A	A C B
Ugrađeni moduli – varijanta 2	A C	A C	A	B C C



Sl. 5.19 Primjer 4 – taktna metoda, shema pneumatskog upravljanja

5.4 Kombinirana metoda

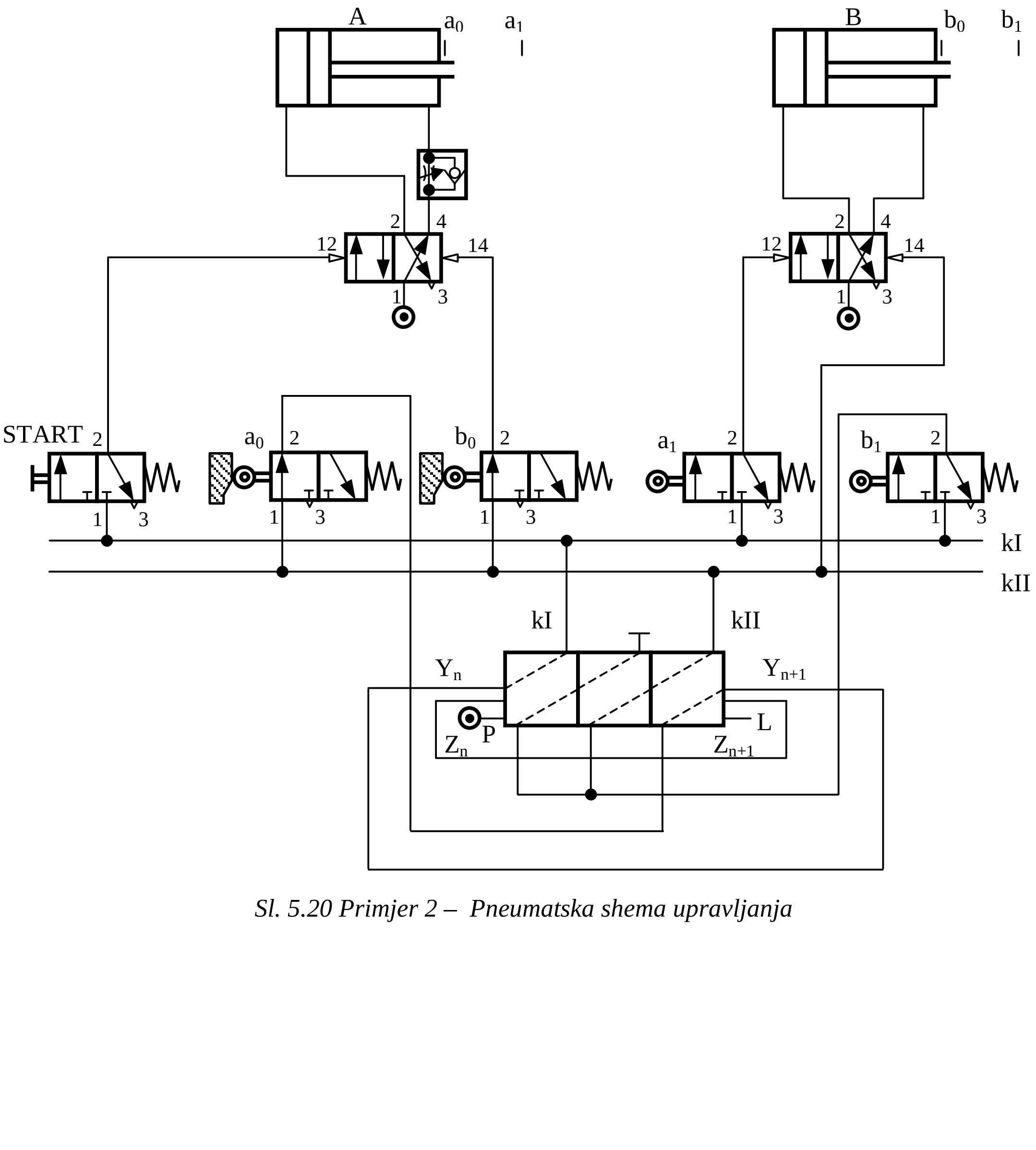
Često se koristi i kombinacija kaskadne i taktne metode. Tada se u kaskadnoj metodi kao kaskadni razvodnici koriste taktni moduli.

Primjer 2

Funkcijski krug prikazan je na *Sl. 5.7*, a pneumatska shema upravljanja na *Sl. 5.20*.

Potrebna su minimalno tri memorijska elementa. Kad su potrebne samo dvije akcije (A_1 i A_3) treba zatvoriti radni priključak A_2 (slijepi priključak), a signal X_2 treba paralelno priključiti na priključke X_1 i X_2 (na prva dva modula).

Ugrađeni su tipovi modula **A, A, B.**



Sl. 5.20 Primjer 2 – Pneumatska shema upravljanja

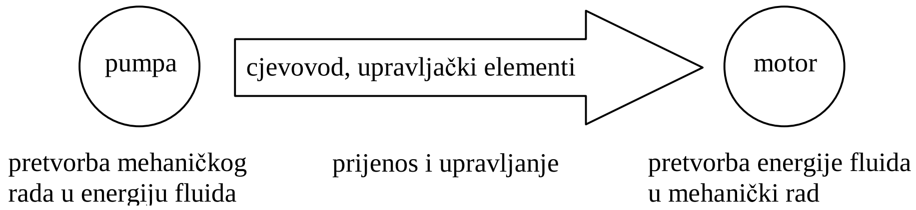
HIDRAULIKA

6 UVOD U HIDRAULIKU

Zadaci hidrauličkog sustava mogu uključivati pretvorbu, prijenos i upravljanje energijom. *Sl. 2.1* shematski prikazuje energetsku pretvorbu u hidrauličkom sustavu.

Osnovni elementi tog sustava su:

– pumpa
– radni fluid
– cjevovod
– upravljački elementi
– hidraulički motor.



Sl. 6.1 Energetska pretvorba u hidrauličkom sustavu

Dvije osnovne mogućnosti regulacije odn. prilagođavanja energije pumpe potrebnoj energiji motora su:

– prigušivanje tlaka
– regulacija protoka pumpe ili motora.

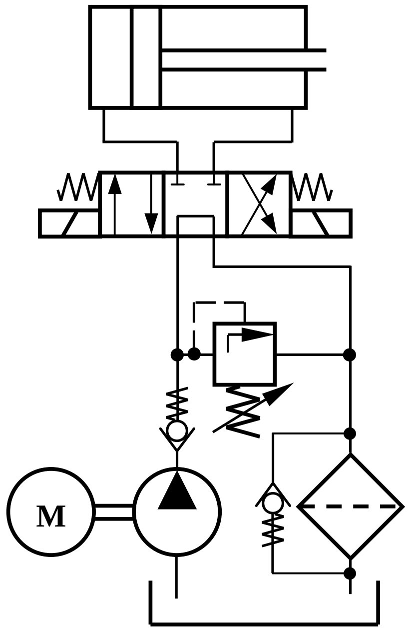
Naravno, potreban je i odgovarajući pogon pumpe (obično elektromotor) gdje se također vrši pretvorba energije.

Za prikazivanje hidrauličkih sustava koriste se hidrauličke sheme. One su normirane – normiran je način prikazivanja hidrauličkih elemenata (normirani simboli) i njihovog povezivanja.

Sl. 6.2 prikazuje principijelnu shemu hidrauličkog sustava. Glavni razvodnik cilindra / motora je 4/3 razvodnik koji se aktivira električki, a centriran je oprugama. U centralnom položaju protok pumpe preusmjerava se nazad u spremnik ulja. H-Q karakteristika volumetričke pumpe gotovo je vertikalna (opasnost od oštećenja pri preopterećenju), pa je pumpu potrebno zaštititi ventilom za ograničenje tlaka (sigurnosni ventil). Nepropusni ventil sprječava natražno strujanje i pojavu preniskog tlak u sustavu. Također, uz filtar se često paralelno priključuje nepovratni ventil kojem je potreban izvjestan tlak za otvaranje (ima funkciju ograničenja tlaka - v. sliku), kako bi se izbjegao preveliki pad tlaka zaprljanog filtra za ulje.

Hidraulika se primjenjuje u situacijama koje zahtijevaju

– **velike sile,** brzine i ubrzanja,
– male, **jednolične pomake** i brzine,
– visoku **točnost pozicioniranja** u međupoložajima,
– **složeniju regulaciju**.



Sl. 6.2 Principijelna shema hidrauličkog sustava

Hidraulika se koristi u vrlo širokom području koje obuhvaća:

- alatne strojeve,
- poljoprivredne strojeve,
- šumarske strojeve,
- cestovna i šinska vozila,
- brodogradnju,
- avio-industriju,
- energetiku,
- rudarstvo,
- vojnu industriju,
- svemirsku tehniku itd.

Prednosti hidrauličkog medija su:

- moguće postizanje **velikih sila**,
- velika **gustoća snage** (P/m ili P/V),
- **jednostavnost pretvorbe energije** medija u mehanički rad
- **mala inercija,**
- automatsko **prilagođavanje** potrebne **sile,**
- moguće **pokretanje pod** punim **opterećenjem,**
- jednostavno i kontinuirano **podešavanje** brzine, sile, momenta itd.
- moguće nagle **promjene smjera** i brzina,
- moguće **velike brzine**,
- moguće ekstremno **niske brzine**,
- lako se realizira **linearno gibanje**,
- precizno **pozicioniranje**,
- jednostavnost **zaštite od preopterećenja**,
- jednostavnost **akumulacije energije** pomoću plinovitog medija,
- jednostavnost **podmazivanja** i odvođenja topline,
- visoka **pouzdanost** u radu,
- visoka **ekonomičnost** u radu,
- jednostavno i jeftino **održavanje**,

Nedostaci hidraulike obuhvaćaju:

– potrebno **generirati hidrauličku energiju**,
– potrebni su **povratni vodovi**,
– relativno **visoka cijena** uređaja i elemenata,
– **specifičnost** (male serije) i preciznost izvedbi,
– **ograničene brzine strujanja** ulja,
– **promjena karakteristika ulja** (s temperaturom i tlakom, starenje),
– relativno **prljav pogon**.

7 HIDROMEHANIČKE OSNOVE

U najvećem broju slučajeva ulje se može smatrati nestlačivim, tj. gustoća ulja se smatra konstantnom (ρ=*const*.). U slučaju kada se strujanje može smatrati stacionarnim, zakoni održanja mase i energije za strujanje ulja u cjevovodnim mrežama hidrauličkih sustava poprimaju sljedeće oblike:

Jednadžba kontinuiteta (zakon održanja mase):

Volumenski protok ulja u cijevi je konstantan

$$Q = vS = const., \tag{7.1}$$

pri čemu v označava srednju protočnu brzinu ulja, a S je poprečni presjek cijevi. U cjevovodnim mrežama mora suma svih volumenskih protoka koji ulaze u čvor cjevovoda (račvu) biti jednak sumi svih protoka koji iz čvora izlaze:

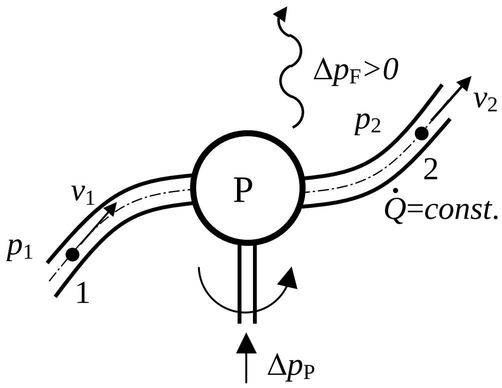
$$\Sigma Q_{\mathrm{ul}} = \Sigma Q_{\mathrm{iz}} , \tag{7.2}$$

Bilanca mehaničke energije (modificirana Bernoullijeva jednadžba):

Zbog relativno malih razlika geodetskih visina, u hidrauličkim krugovima najčešće se zanemaruje gravitacijski potencijal. Dakle, bilanca specifične mehaničke energije (energija po jedinici volumena) za strujanje ulja kroz cjevovod odn. dionicu cjevovoda od odabranog ulaznog presjeka 1 do izlaznog presjeka 2 glasi

$$p_1 + \alpha_1 \rho \frac{v_1^2}{2} + \Delta p_{\mathrm{P}} - \Delta p_{\mathrm{M}} = p_2 + \alpha_2 \rho \frac{v_2^2}{2} + \sum \Delta p_{\mathrm{F}} , \tag{7.3}$$

pri čemu p označava tlak (pretlak) ulja, ρ gustoću ulja, v srednju protočnu brzinu ulja, Δp_{P} je prirast totalnog tlaka u pumpi, Δp_{M} je pad totalnog tlaka u hidrauličkom motoru, a $\Sigma\Delta p_{\mathrm{F}}$ je zbroj svih linijskih i lokalnih gubitaka od presjeka 1 do presjeka 2. U hidrauličkim mrežama prisutno je i laminarno i turbulentno strujanje ulja. Koeficijent ispravka kinetičke energije za laminarno strujanje je α=2 (za cijev kružnog promjera), dok u turbulentnom režimu iznosi $\alpha\approx$1.



Sl. 7.1 Primjer uz modificiranu Bernoullijevu j. – dionica cjevovoda s pumpom

Pumpa i motor

Snaga stroja (motora, pumpe) na spojci jednaka je umnošku momenta na spojci (vratilu) i kutne brzine vrtnje ($P = M\omega$).

Snaga pumpe P_P jednaka je:

$$P_P = \frac{Q\Delta p_P}{\eta_P}, \tag{7.4}$$

pri čemu je η_P ukupni stupanj korisnog djelovanja pumpe, a snaga motora:

$$P_M = \eta_M Q \Delta p_M, \tag{7.5}$$

pri čemu je η_M ukupni stupanj korisnog djelovanja motora.

U hidraulici se uglavnom koriste volumenske pumpe i motori, kod kojih protok Q zavisi od radnog volumena (V) i broja okretaja (n) stroja. Tako npr. za klipnu pumpu teoretski protok iznosi

$$Q = znV, \tag{7.6}$$

pri čemu je z broj cilindara pumpe.

Gubici

Za dionicu cjevovoda duljine L i konstantnog promjera D linijski gubitak (pad tlaka) može se odrediti izrazom

$$\Delta p_F = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2}, \tag{7.7}$$

pri čemu je λ koeficijent viskoznog trenja ulja koji općenito zavisi o relativnoj srednjoj visini hrapavosti cijevi k/D i Reynoldsovom broju:

$$\mathbf{Re} = \frac{vD}{\nu} = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\mu \pi D}, \tag{7.8}$$

gdje ν označava koeficijent kinematičke viskoznosti ulja, a μ koeficijent dinamičke viskoznosti ulja. Za vrijednosti Reynoldosovog broja manje od kritične ($\mathbf{Re}<\mathbf{Re}_k$) strujanje je laminarno, a za veće ($\mathbf{Re}>\mathbf{Re}_k$) je turbulentno.

Za strujanje u *cijevi kružnog presjeka* obično se kao kritični Reynoldsov broj prihvaća vrijednost $\mathbf{Re}_k$=2320, a u laminarnom režimu strujanja vrijedi

$$\lambda = \frac{64}{\mathbf{Re}}. \tag{7.9}$$

Za turbulentno strujanje koriste se eksperimentalne formule i/ili dijagrami (Moodyev dijagram).

Lokalni gubici u nekom elementu armature cjevovoda (npr. ventil, koljeno, ili račva) mogu se odrediti prema izrazu

$$\Delta p_F = K \rho \frac{v^2}{2} = \lambda \frac{L_e}{D} \rho \frac{v^2}{2}, \tag{7.10}$$

pri čemu je K koeficijent lokalnog gubitka u tom elementu armature. U priručnicima se koeficijent lokalnog gubitka često izražava pomoću ekvivalentne duljine cijevi $L_e = KD/\lambda$.

Svi gubici strujanja (linijski i lokalni) predstavljaju onaj dio mehaničke energije ulja koji se putem trenja transformira u unutrašnju energiju ulja. Isto vrijedi i za velik dio gubitaka u strojevima (pumpe i motori). Povećanje unutrašnje energije ulja dovodi do odgovarajućeg povećanja temperature ulja. Promjena ove temperature mora se

proračunavati, a zbog nje je često potrebno ugraditi hladnjak za ulje. Za rad na otvorenom ponekad je potrebno ugraditi i grijač za ulje.

Primjer – Potrebna snaga pumpe

Odredite potreban protok Q, prirast totalnog tlaka Δp_P i snagu pumpe P_P za jednostavni hidraulički sustav prikazana na *sl. 6.2*. Poznati su sljedeći podaci:

ρ = 880 kg/m^3 .... gustoća ulja
F = 120 kN .... potrebna sila na klipnjači cilindra
D = 150 mm .... promjer cilindra
v_K = 0,1 m/s .... brzina izvlačenja klipnjače
η_{Kv} = 96%=0,96 .... volumetrički stupanj korisnog djelovanja cilindra
η_{Km} = 95%=0,95 .... hidrauličko-mehanički stupanj korisnog djelovanja cilindra
d = 20 mm .... promjer cjevovoda
L = 15 m .... ukupna duljina cjevovoda
q_v = 1%=0,01 .... volumetrički gubitak u cjevovodu
λ = 0,04 .... koeficijent viskoznog trenja u cijevi
L_{eV} = 4 m .... ekvivalentna duljina (gubitak) za povratni ventil
L_{eR} = 3 m .... ekvivalentna duljina (gubitak) za razvodnik
L_{eF} = 1 m .... ekvivalentna duljina (gubitak) za filtar
η_P = 75% = 0,75 .... stupanj korisnog djelovanja pumpe (ukupni)

Rješenje

Potreban protok i pad tlaka na cilindru iznose

$$Q_K = \frac{\pi D^2}{4} \frac{v_K}{\eta_{Kv}} = 1{,}841 \frac{l}{s} \ ,$$

$$\Delta p_K = \frac{4}{\pi D^2} \frac{F}{\eta_{Km}} = 7{,}148 \ MPa \ ,$$

tako da je traženi protok kroz pumpu

$$Q = (1 + q_v) Q_K = 1{,}859 \frac{l}{s} \ .$$

Ukupna ekvivalentna duljina cjevovoda (za sve lokalne gubitke) je

$L_e = L_{eV} + L_{eR} + L_{eF}$ = 8 m,

pa je ukupni gubitak tlaka u cjevovodu jednak

$$\Delta p_F = \lambda \frac{L + L_e}{d} \rho \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4} = 7{,}089 \ bar \ .$$

Traženi prirast tlaka u pumpi iznosi

$$\Delta p_P = \Delta p_K + \Delta p_F = 7{,}857 \ MPa$$

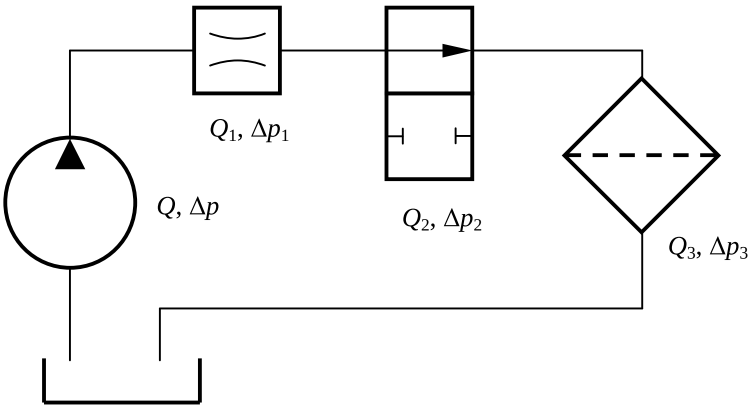
a potrebna snaga pumpe (na vratilu) je

$$P_P = \frac{1}{\eta_P} Q \Delta p_P = 19{,}48 \ kW$$

Serijski i paralelni spoj elemenata

Kod serijskog spajanja elemenata (gubitaka ili otpora), ukupni protok Q jednak je protoku Q_i kroz bilo koji element (jed. kontinuiteta: $Q = Q_i$), dok je ukupni pad tlaka Δp jednak sumi gubitaka tlaka na svim elementima u seriji ($\Delta p = \Sigma \Delta p_i$).

Primjer serijskog povezivanja elemenata (pumpa, prigušnica, 2/2 razvodnik, filtar) u hidraulici



Sl. 7.2 Primjer serijskog povezivanja

Za ovaj primjer jednadžba kontinuiteta i jednadžba bilance mehaničke energije (uz zanemarivanje gubitaka u cijevima) glase:

$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$

$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$

Ako se po analogiji s električnom strujom uvede pojam otpora R strujanju prema relaciji

$$\Delta p_{\mathrm{F}} = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{8}{\pi^2 D^4} Q^2 = R Q^2 , \qquad (7.11)$$

pri čemu L može biti stvarna i/ili ekvivalentna duljina cijevi, tada je ukupni gubitak tlaka na serijski vezanim elementima (otporima) jednak

$$\Delta p_{\mathrm{F}} = \sum \Delta p_{\mathrm{Fi}} = \sum R_{\mathrm{i}} Q^2 = R Q^2 . \qquad (7.12)$$

Prema tome ukupni otpor serijski vezanih otpora jednak je zbroju tih otpora

$$R = \sum R_{\mathrm{i}} . \qquad (7.13)$$

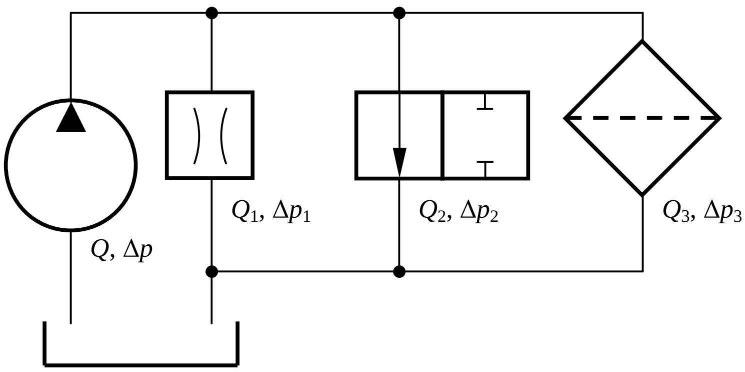
Kod paralelnog spajanja elemenata, ukupni protok Q jednak je sumi protoka Q_i kroz sve paralelno spojene elemente ($Q = \Sigma Q_i$), dok je ukupni pad tlaka Δp isti odn. jednak padu tlaka Δp_i na svakom elementu u seriji ($\Delta p = \Delta p_i$).

Primjer paralelnog povezivanja elemenata u hidraulici

Za ovaj primjer jednadžba kontinuiteta i jednadžba bilance mehaničke energije (uz zanemarivanje gubitaka u cijevima) glase:

$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$\Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3$



Sl. 7.3 Primjer paralelnog povezivanja

Uvođenjem otpora strujanja R, i uzevši u obzir da je gubitaka tlaka Δp_F na svim paralelno spojenim elementima (otporima) međusobno jednak, jednadžba kontinuiteta može se zapisati u obliku

$$\sqrt{\frac{\Delta p_F}{R}} = \sum \sqrt{\frac{\Delta p_F}{R_i}} \,, \tag{7.14}$$

Prema tome, za ukupni otpor paralelno vezanih otpora vrijedi relacija

$$\frac{1}{\sqrt{R}} = \sum \frac{1}{\sqrt{R_i}} \,, \tag{7.15}$$

u kojoj se za razliku od električne struje, u nazivnicima pojavljuju kvadratni korijeni.

Kavitacija i hidraulički udar

Kavitacija je pojava parne faze unutar kapljevine (isparavanje ulja). Javlja se na mjestu na kojem unutar hidrauličkog sustava tlak padne na razinu tlaka isparavanja (zasićenja) ulja. Kada nakon pojave isparavanja ulje dođe u područje viših tlakova, dolazi do implozije parnih mjehurića i time do vrlo intenzivne erozije materijala i brzog trošenja (uništenja) hidrauličkih elemenata. Zato unutar sustava tlak nigdje ne smije pasti na nivo tlaka isparavanja. Tlak isparavanja zavisi od vrste i temperature ulja, a problemi s kavitacijom se u praksi javljaju kad apsolutni tlak ulja padne ispod vrijednosti 0,3 bar.

Hidraulički udar je pojava opasno visokog tlaka (tlačni udar) izazvana naglom promjenom količine gibanja ulja. Javlja se prilikom nagle obustave ili uspostavljanja protoka (npr. naglo zatvaranje ili otvaranje ventila), naročito unutar razmjerno dugog cjevovoda. Prilikom proračuna vezanih uz hidraulički udar nužno je uzeti u obzir stlačivost ulja. Povećanje tlaka Δp prilikom trenutnog zatvaranja protoka (naglo zatvaranje ventila) u apsolutno krutoj cijevi iznosi

$$\Delta p = \rho c v, \tag{7.16}$$

pri čemu je c brzina zvuka u ulju, a v brzina strujanja ulja prije zatvaranja. Postupci kojima se sprječava tlačni udar obuhvaćaju ugradnju hidrauličkog akumulatora ili ugradnju razvodnika koji se sporije zatvaraju.

8 RADNI FLUIDI

Izbor odgovarajućeg radnog fluida ima bitan utjecaj na ispravno funkcioniranje, trajnost, pouzdanost i ekonomičnost hidrauličkog sustava. Izbor fluida utječe i na izbor hidrauličkih elemenata (filtri, ventili, brtve...) koji se projektiraju za određenu vrstu fluida. Od posebnog značaja je korištenje fluida koji nema štetnog utjecaja na materijal brtvi.

Zadaci radnog fluida su:

- prijenos energije (glavni zadatak)
- hlađenje
- podmazivanje
- zaštita od korozije
- odnošenje nečistoća

Zahtjevi koji se postavljaju na radne fluide obuhvaćaju:

- neznatna stlačivost
- sposobnost podmazivanja
- mala promjena viskoznosti s temperaturom
- otpornost na visoka termička opterećenja
- mala sklonost oksidaciji
- mala sposobnost upijanja plinova
- mala sklonost stvaranju pjene
- ne-higroskopnost
- postojanost karakteristika tijekom starenja
- netoksičnost i ekološka prihvatljivost
- ne-agresivnost odn. kompatibilnost sa materijalima elemenata
- nezapaljivost (visoka temperatura paljenja)
- visok električni otpor
- niska cijena
- niski troškovi održavanja

Vrste radnih fluida koji se koriste u hidraulici su:

- voda i vodene emulzije,
- mineralna ulja,
- sintetički fluidi,
- tekući metali i legure.

Klasifikacija (oznake) pojedinih radnih fluida provedena je prema aditivima (dodaju se u svrhu poboljšanja nekih svojstava fluida). Tehnološki napredak hidrauličkih fluida je intenzivan. Danas se, zbog dobrog podmazivanja i dobre zaštite od korozije, u najvećoj mjeri koriste mineralna ulja (za temperature –50 do 80 ^{0}C). Zato se i termin hidrauličko ulje koristi kao sinonim za hidraulički fluid. Nedostaci mineralnih ulja su velika promjena viskoznosti s temperaturom i izdvajanje smole na višim temperaturama. Za temperature iznad 80 ^{0}C (do 400 ^{0}C) koriste se sintetička ulja, a za još više temperature (-10 do 770 ^{0}C) tekući metali i njihove legure [5]. Tablica prikazuje klasifikaciju hidrauličkih ulja prema normi ISO 6743/4.

Viskoznost je najvažniji parametar pri odabiru radnog fluida. To fizikalno svojstvo predstavlja mjeru sile (tangencijalna naprezanja) unutrašnjeg trenja koje se javlja pri međusobnom klizanju slojeva fluida. Izražava se koeficijentom dinamičke (μ) ili kinematičke (ν) viskoznosti ($\nu = \mu/\rho$). Viskoznost tvari povećava se porastom tlaka, a smanjuje porastom temperature. Naročito se u zrakoplovstvu od fluida zahtijeva

približna postojanost svojstava s porastom temperature. Prevelika viskoznost izaziva visoke gubitke tlaka, posebice u hladnim uvjetima, a premala dovodi do opasnosti od propuštanja kroz brtve. Preporučuje se da točka tečenja (najniža temperatura pri kojoj fluid teče) bude bar 8 ^{0}C niža od najniže temperature koja se može pojaviti u hidrauličkom sustavu [8].

Tablica 8.1 [8], [9]

Oznaka	Sastav i osnovna svojstva
HH	Neinhibirano rafinirano mineralno ulje
HL	Rafinirano mineralno ulje s dodatkom aditiva protiv oksidacije i za zaštitu od korozije
HM	Svojstva ulja HL s poboljšanim svojstvima protiv trošenja
HR	Svojstva ulja HL s dodatkom aditiva za poboljšanje indeksa viskoznosti
HV	Svojstva ulja HM s dodatkom aditiva za poboljšanje indeksa viskoznosti
HG	Svojstva ulja HM s antistic-slip svojstvima
HS	Sintetička teško zapaljiva tekućina
HF	Teško zapaljive tekućine s vodom
HFAE	Emulzija ulja u vodi ili vodena otopina koja sadrži maks. 20% gorivog materijala
HFAS	Otopina kemikalija s min. 80% vode
HFB	Emulzija vode uz ulju s maks. 20% gorivog materijala
HFC	Vodena otopina s aditivom za povećanje viskoznosti i min. 35% vode
HFD	Teško zapaljive tekućine bez vode
HFDR	Sintetička tekućina na bazi fosfat-estera
HFDS	Sintetička tekućina na bazi kloriranih ugljikovodika
HFDT	Mješavina tekućina HFDR i HFDS
HFDU	Teško zapaljiva tekućina drugog sastava

Stlačivost. Modul stlačivosti ulja iznosi 1,5÷2 GPa [10]. Promjena volumena fluida pri porastu tlaka na 10 MPa uglavnom ne prelazi 0,7% [8] i najčešće se ne uzima u obzir, ali fluidi koji sadrže otopljeni zrak postaju stlačiviji, što može izazvati smetnje.

Voda i tekući metali imaju slabu **mazivost** (sposobnost podmazivanja – stvaranja zaštitnog filma). Zato se umjesto vode koriste emulzije vode i ulja. Mazivost mineralnih ulja još se poboljšava dodatkom aditiva koji pospješuju stvaranje dugih lanaca molekula.

Otapanje plinova (iz zraka) u tekućini pospješuje kavitaciju i druge neželjene pojave (emulzija tekućine i plina, pjena) u radu hidrauličkih uređaja. **Stvaranje emulzije tekućina-plin i/ili pjene** povećava stlačivost i pospješuje kavitaciju, koroziju i starenje ulja. Stvaranje pjene u mineralnom ulju bit će znatno intenzivnije ako je prisutan i najmanji sadržaj vode (dozvoljeno maks. 0,5% vode).

Čista mineralna ulja nisu **toksična**, ali su njihovi aditivi često otrovni. Ekološki prihvatljivi fluidi znatno su skuplji.

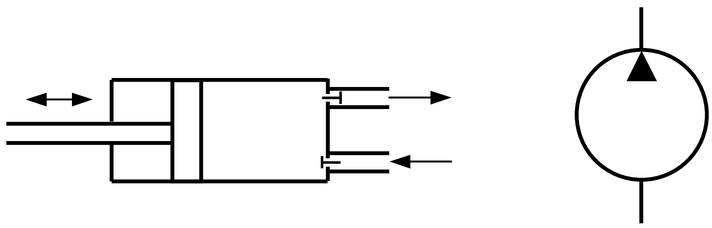
Starenje fluida (oksidacija) pospješuju otopljeni zrak, čestice metala i nečistoća (rđa, produkti starenja), voda i povišena temperatura. Tekući metali naročito su skloni oksidaciji u doticaju sa zrakom. Čestice nečistoće dovode do opasnosti od habanja, blokiranja i začepljenja hidrauličkih elemenata. Kod mineralnih ulja, pojavljuju se i produkti starenja u obliku čestica. Ulje se mora kontinuirano čistiti (filtrirati), te zamjenjivati prema uputama proizvođača. **Radna temperatura** ulja mora se održavati u propisanim granicama. Voda i njene emulzije dodatno donose i opasnost od zamrzavanja, zbog čega se često dodaje glikol.

Kao **vatrootporni** fluidi koriste se emulzije (rastvori) ulja u vodi (HFA), polimera u vodi (HFC – najčešće se koristi) ili sintetičke tekućine (HFD). U pogonima u kojima postoji opasnost od požara i/ili eksplozije moraju se koristiti teško zapaljivi fluidi.

9 PUMPE

Pumpe (crpke) su strojevi u kojima se izvana dovedena mehanička energija (rad pogonskog stroja) transformira u energiju radnog fluida. Rotacijski hidraulički motori su slični strojevi kod kojih se transformacija energije obavlja u suprotnom smjeru (energija fluida pretvara se u mehanički rad). Zavisno od priključivanja, često isti stroj može raditi kao pumpa ili motor (za takav stroj se kaže da je reverzibilan, ali reverzibilnost također može značiti i samo mogućnost vrtnje u oba smjera). Za pogon pumpe obično se koriste elektromotori, a u mobilnoj hidraulici motori s unutrašnjim izgaranjem.

Pumpe se dijele u dvije osnovne kategorije: **volumenske** pumpe (volumetričke) i **dinamičke** pumpe (najčešće strujne tj. turbopumpe). Volumenske pumpe transportiraju fluid (ostvaruju povećanje tlaka i protok) putem smanjenja volumena komora u pumpi, a koriste se za relativno male protoke uz relativno velike visine dobave. Princip rada volumenske pumpe prikazan je na *Sl. 4.15*, na primjeru cilindarske pumpe. Pomicanjem klipa ulijevo obavlja se faza usisa (punjenje cilindra), a pomicanjem klipa udesno faza tlačenja (pražnjenje) cilindra. Na slici su također prikazani usisni i tlačni ventil, koji su nužno prisutni kod npr. klipne pumpe s koljeničastim mehanizmom. Kod pumpi se zbog povoljnog redoslijeda promjene tlaka najčešće koriste samoradni ventili (bez vanjske intervencije odn. energije). Tijekom usisa, otvara se usisni (donji) ventil i zatvara tlačni (gornji) pomoću podtlaka u cilindru, dok se tijekom tlačenja otvara tlačni ventil, uz istovremeno zatvaranje usisnog ventila. Ovakvo samoradno otvaranje i zatvaranje ventila kod motora nije moguće zbog nepovoljnog redoslijeda promjene tlaka. Motori koji imaju ventile moraju imati i mehanizam za otvaranje i zatvaranje ventila (bregasta osovina).



Sl. 9.1 Princip rada i simbol volumenske pumpe

Turbopumpe u rotoru predaju snagu fluidu tako da pokretne lopatice ostvaruju silu pritiska na fluid. Primjenjuju se za relativno velike protoke i male visine dobave, pa se zato u hidraulici u principu ne koriste.

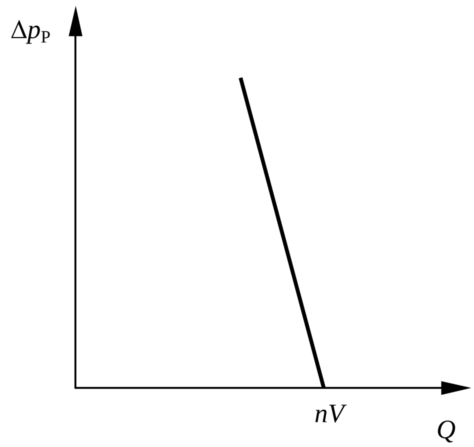
Protok i tlak

Teoretski protok kroz volumensku pumpu jednak je umnošku broja okretaja pumpe n i radnog volumena pumpe V, pa prema tome ne zavisi od radnog tlaka pumpe. Stvarni protok kroz pumpu jednak je

$$Q = \eta_V n V, \tag{9.1}$$

pri čemu je η_V volumetrički stupanj djelovanja pumpe. Volumenski gubici $(1-\eta_V)nV$ rastu linearno s povećanjem prirasta tlaka Δp_P u pumpi (volumenski protok Q se linearno smanjuje). Prema tome, prirast tlaka Δp_P u pumpi linearno opada s povećanjem protoka (radna karakteristika pumpe - *Sl. 9.2*). Radna karakteristika volumenskih pumpi vrlo je strma, pa su posebno opasne situacije u kojima je hidraulički otpor iza pumpe prevelik (npr. zatvoreni tlačni ventil praktički predstavlja

beskonačni otpor). U tim situacijama volumenska pumpa tipično povećava razinu tlaka do enormnih vrijednosti, sve dok neki od elemenata ne popusti (oštećenje, pucanje, pregaranje motora ili sl.). Zato se takva pumpa obavezno štiti ventilom za ograničenje tlaka.



Sl. 9.2 Radna karakteristika volumenske pumpe

Protok volumenskih pumpi je neravnomjeran, a kao mjera te neravnomjernosti koristi se *stupanj nejednolikosti protoka* σ definiran kao omjer maksimalnog Q_{maks} i srednjeg protoka Q

$$\sigma = Q_{\mathrm{maks}}/Q \tag{9.2}$$

Najnepovoljniji mogući slučaj javlja se npr. kod jednocilindarske jednoradne klipne pumpe kod koje je protok u fazi usisa (prva polovica zakreta vratila tj. $0<\alpha<\pi$) jednak nuli, a u fazi tlačenja ($\pi<\alpha<2\pi$) približno jednak produktu $Q_{\mathrm{maks}}\cdot\sin\alpha$, tj.

$$\sigma = \frac{Q_{\mathrm{maks}}}{\frac{1}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi} Q_{\mathrm{maks}} \sin\alpha d\alpha} = \pi\,, \tag{9.3}$$

Prema tome vrijedi $1<\sigma<\pi$, pri čemu $\sigma=1$ odgovara najpovoljnijem mogućem slučaju kontinuiranog protoka ($Q = Q_{\mathrm{maks}} = const.$). Stupanj nejednolikosti protoka smanjuje se korištenjem pumpi s većim brojem radnih volumena (više cilindara, lamela ili zubaca) ili ugradnjom tlačnih kompenzatora (amortizera). Nejednolikost protoka prati i nejednolikost tlaka u cjevovodu (ista je frekvencija, dok oblik, amplituda i fazni pomak krivulje promjene radnog tlaka zavise od cjevovoda). Uz korištenje uobičajenih pumpi, nejednolikost protoka u hidrauličkim sustavima je mala – varijacije protoka obično ne prelaze 1%.

Prirast tlaka Δp_P u pumpi je parametar koji odgovara visini dobave pumpe (pomnoženoj sa specifičnom težinom radnog fluida). U hidraulici je zbog relativno visokih tlakova od većeg interesa parametar *maksimalni radni tlak* pumpe. Uobičajene vrijednosti maksimalnog radnog tlaka pumpe u hidraulici se kreću oko 10-60 MPa.

Snaga i stupanj korisnog djelovanja

Snaga pumpe jednaka je umnošku momenta na spojci (vratilu) i kutne brzine vrtnje ($P_P = M\omega$). Najčešća brzina vrtnje hidrauličkih pumpi iznosi $n = 1500$ o/min (dvopolni elektromotor). Snaga pumpe P_P jednaka je

$$P_{\mathrm{P}} = \frac{Q\Delta p_{\mathrm{P}}}{\eta_{\mathrm{P}}}\,, \tag{9.4}$$

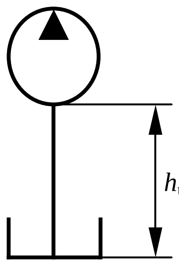
pri čemu je η_{P} ukupni stupanj korisnog djelovanja pumpe, koji je produkt dva stupnja korisnog djelovanja kojima se uzimaju u obzir tri kategorije gubitaka

$$\eta_{\mathrm{P}} = \eta_{\mathrm{v}}\eta_{\mathrm{m}}\,, \tag{9.5}$$

volumetričkih gubitaka (propuštanja fluida kroz brtve i zazore) izraženih volumetričkim stupnjem korisnog djelovanja η_{v} i hidrauličkih gubitaka (gubici trenja fluida u pumpi) zajedno s mehaničkim gubicima (gubici u mehaničkim dijelovima poput brtve, ležajeva, spojki) izraženih mehaničkim stupnjem korisnog djelovanja η_{m}.

Kavitacija i usisna visina

Najniža vrijednost apsolutnog tlaka u pumpi (javlja se u fazi usisa) mora uvijek biti viša od tlaka isparavanja radnog fluida. Zbog tog razloga ograničena je maksimalna usisna visina pumpe h_{u}.



Sl. 9.3 Usisna visina pumpe

U slučaju priključka pumpe na spremnik pri atmosferskom tlaku (*Sl. 9.3*), postavljanjem modificirane Bernoullijeve jednadžbe za usisni cjevovod dobiva se izraz za maksimalnu usisnu visinu pumpe

$$h_{\mathrm{u}} < h_{\mathrm{u,maks}} = \frac{p_{\mathrm{a}} - p_{\mathrm{min}} - \sum \Delta p_{\mathrm{Fu}}}{\rho g} - \frac{v^2}{2g}\,, \tag{9.6}$$

pri čemu je p_{a} lokalni atmosferski tlak, $\Sigma\Delta p_{\mathrm{Fu}}$ suma svih gubitaka u usisnom cjevovod, v brzina fluida na ulazu u pumpu, a p_{min} neophodni minimalni apsolutni tlak na ulazu u pumpu koji zadovoljava izraz

$$NPSH = \frac{p_{\mathrm{min}} - p_{\mathrm{v}}}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}\,, \tag{9.7}$$

u kojem je p_{v} tlak isparavanja radnog fluida, a *NPSH* je neto pozitivna usisna visina pumpe (Net Positive Suction Head) koja predstavlja karakteristiku dane pumpe u zavisnosti od broja okretaja i utvrđuje se eksperimentalno. Obično maksimalna usisna visina pumpe $h_{\mathrm{u,maks}}$ iznosi 1-2 m. Kad je visina usisa h_{u} zadana, moguće je iz gornjih izraza odrediti maksimalni dozvoljeni protok odn. broj okretaja pumpe.

Podjela volumenskih pumpi:

1. Zupčasta
    a) s vanjskim ozubljenjem
    b) s unutrašnjim ozubljenjem
    c) sa zupčastim prstenom
2. Vijčana
3. Krilna (lamelna)
    a) s 1 komorom
        – s konstantnim protokom
        – s promjenljivim protokom
    b) s više komora – višeradne (konstantni protok)
4. Klipna
    a) klipno-aksijalna (s aksijalno postavljenim ekscentrom)
        – s nagibnom pločom (s mirujućim ekscentrom)
        – s nagibnom osi (s rotirajućim ekscentrom)
    b) klipno-radijalna (s radijalno postavljenim ekscentrom)
        – s unutrašnjim djelovanjem (vanjskim ekscentrom)
        – s vanjskim djelovanjem (unutrašnjim ekscentrom)
    c) s koljeničastim mehanizmom
    d) s kulisnim mehanizmom
5. Membranska

Membranske pumpe, te klipne pumpe s koljeničastim mehanizmom i kulisnim mehanizmom rijetko se koriste u hidraulici.

Jednokomorne krilne i klipne pumpe s aksijalnim ekscentrom i s vanjskim radijalnim ekscentrom imaju mogućnost variranja protoka (promjenljivi protok). Sve zupčaste i vijčane pumpe imaju konstantan protok.

Tablica donosi usporedbu karakteristika pojedinih hidrauličkih pumpi i motora.

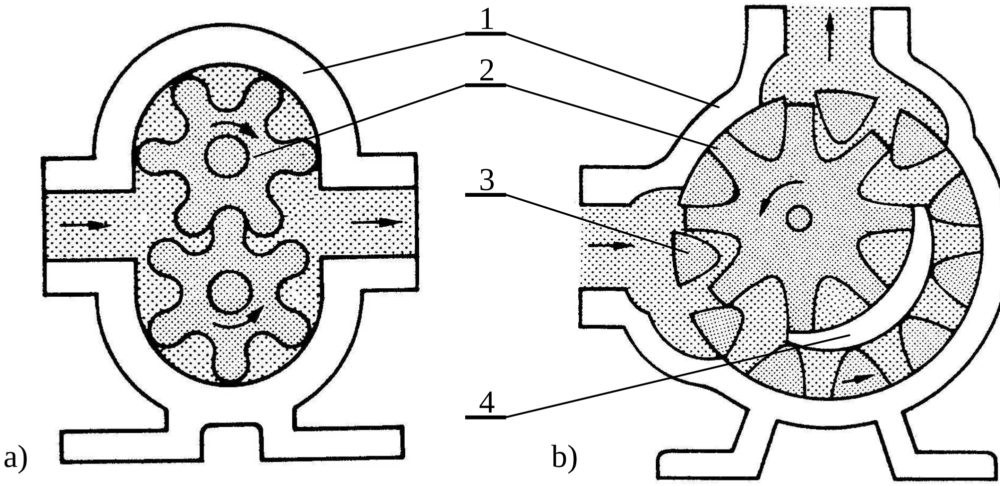
Tablica 9.1 Karakteristike hidrauličkih pumpi i motora [5]

Vrsta	Radni volumen, cm^3	Radni tlak, MPa	Maks. tlak, MPa	Br. okretaja, o/min	Koeficijent korisnog djelovanja	Buka, dB
Zupčasta	12-250	6-16	20	500-3500	0,8-0,91	<87
Sa zupčastim prstenom	63-500	20	25	25-1000	0,75-0,85	81-85
Vijčana	4-630	3-16	20	500-4000	0,7-0,84	<65
Krilna	5-160	10-16	20-25	960-3000	0,8-0,93	76-82
Radijalna – vanjski eksc.	5-160	16-32	32	960-3000	0,8-0,9	76-82
Radijalna – unutr. eksc.	50-450	32-40	63	750-1500	0,87-0,95	<90
Aksijalna – nag. ploča	25-800	16-32	40-48	750-8000	0,8-0,92	<85
Aksijalna – nag. os	25-800	16-25	32	750-3000	0,82-0,93	<85

9.1 Zupčasta pumpa

a) Zupčasta pumpa s vanjskim ozubljenjem

Fluid se transportira kroz prostor između zupčanika i kućišta (*Sl. 4.16 a*), na mjestu izlaska zupčanika iz zahvata (otvara se radni volumen) fluid se usisava, a na mjestu njihovog ulaska u zahvat (zatvara se radni volumen) fluid se tlači.



Sl. 9.4 Zupčasta pumpa s vanjskim (a) i unutrašnjim (b) ozubljenjem [11]*: 1 – stator, 2 – zupčanik, 3 – zupčanik s unutrašnjim ozubljenjem, 4 - pregrada*

Karakteristike:

- Jednostavna konstrukcija
- Niska cijena
- Mala težina
- Širok raspon brzina
- Širok raspon viskoznosti radnog fluida

Ove pumpe imaju prilično velike volumetričke gubitke (stupanj korisnog djelovanja $\eta = 75 \div 85\%$ [12]) i stvaraju relativno veliku buku. Nisu osobito osjetljive na nečistoću i zahtijevaju samo minimum održavanja. Relativno su lagane – imaju naročito povoljan odnos snage i mase pumpe, pa su pogodne za primjenu kod mobilne hidraulike (vozila, građevinski i šumarski strojevi).

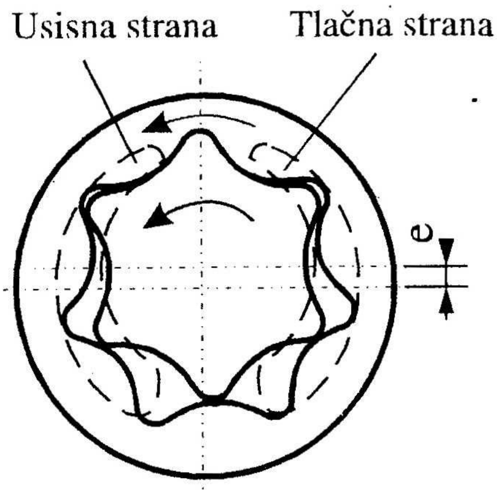
b) Zupčasta pumpa s unutrašnjim ozubljenjem

Prostor oko vanjskog zupčanika podijeljen je na dva dijela – usisni i tlačni (*Sl. 4.16 b*). Pri izlasku zupčanika iz zahvata fluid kroz otvore u vanjskom zupčaniku ulazi u prostor između zupčanika, s kojim se kreće uz unutrašnji dio kućišta – pregradu – koja služi kao brtva između usisne i tlačne strane. Nakon prelaska u tlačnu zonu, zupčanici ponovno ulaze u zahvat, istiskujući fluid kroz otvore vanjskog zupčanika.

Odlikuje se tihim radom, ali je složenija od pumpe s unutrašnjim ozubljenjem, pa se znatno manje koristi.

c) Zupčasta pumpa sa zupčastim prstenom

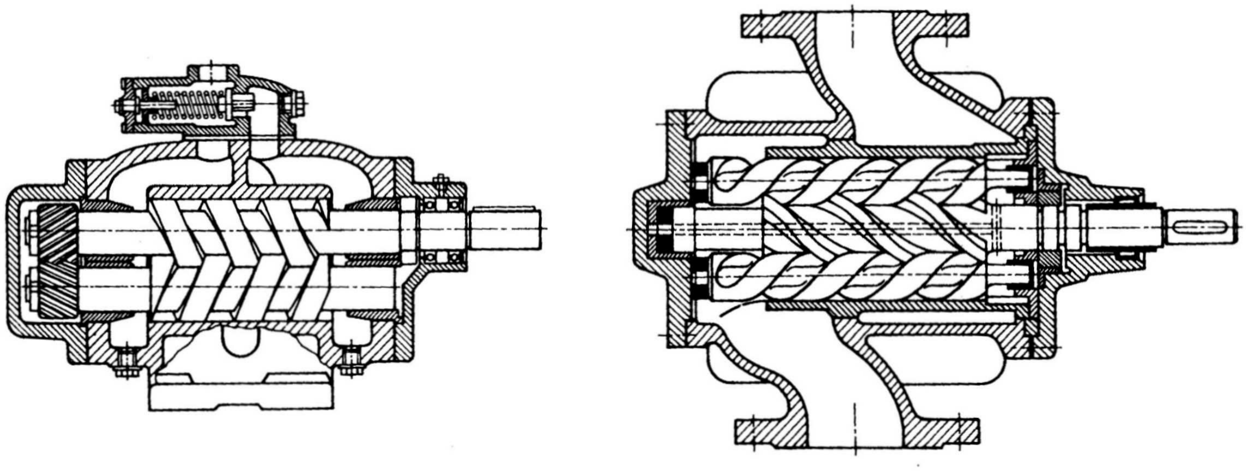
Zupčasta pumpa sa zupčastim prstenom (*Sl. 4.17*) naziva se još rotorna prstasta pumpa ili pumpa s unutrašnjim ozubljenjem bez pregrade. Zupčanik s unutrašnjim ozubljenjem (zupčasti prsten) ima jedan zub više od zupčanika s vanjskim ozubljenjem. Svi zubi zupčanika s vanjskim ozubljenjem simultano su u dodiru sa zupčastim prstenom i tako ostvaruju brtvljenje između usisne i tlačne strane. Ova pumpa ima nisku razinu buke i nejednolikosti protoka uz nešto slabije brtvljenje i veću sklonost habanju.



Sl. 9.5 Zupčasta pumpa sa zupčastim prstenom [8]

9.2 Vijčana pumpa

Postoje izvedbe s 2, 3, 4 ili 5 vretena. Promjena volumena radnog prostora ostvaruju se ulaskom početka navoja jednog vratila u prostor između navoja drugog vratila (*Sl. 9.6*).



Sl. 9.6 Vijčana pumpa s 2 i 3 vretena [11]

Karakteristike:

- Tihi rad
- Ravnomjeran protok i tlak
- Ravnomjeran pogonski moment
- Širok dijapazon protoka

Gubici zbog zračnosti relativno su veliki (stupanj korisnog djelovanja η<80% [12]), pa se pumpa u pravilo koristi za niže tlakove (do 10 MPa). Grade se za male i veoma velike protoke (pretovar tankera za naftu). Često se koristi u naftnoj industriji, u lokomotivama, kao pumpa za transport viskoznih fluida, pomoćna pumpa za filtriranje (posebni krug za filtriranje).

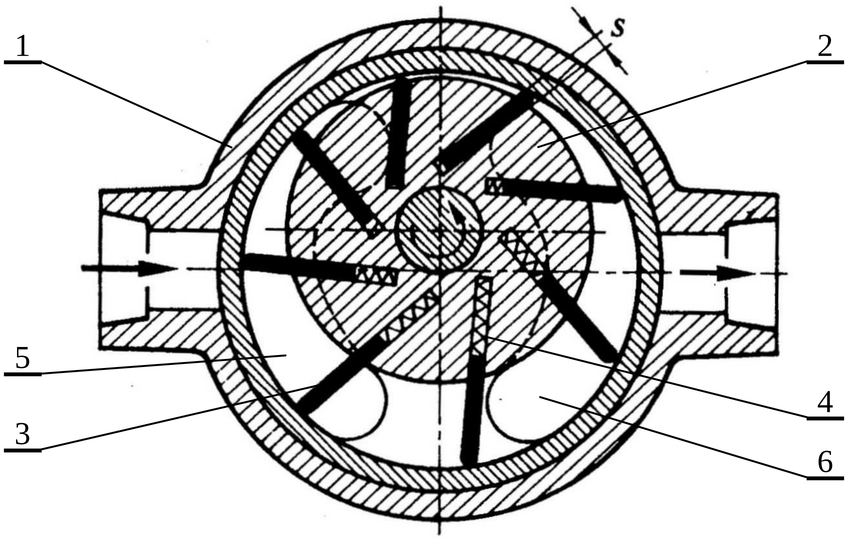
9.3 Krilna pumpa

Krilna ili lamelna pumpa najčešće se izvodi s lamelama u rotoru (*Sl. 4.19*). Rotor pumpe smješten je ekscentrično u stator, tako da se radna komora (volumen između dviju lamela, rotora i statora) povećava u prvoj polovici zakreta ($0<\alpha<\pi$, faza usisa), a smanjuje u drugoj polovici zakreta ($\pi<\alpha<2\pi$, faza tlačenja).

Razvodna ploča (dio statora) ima usisni i tlačni kanal u obliku polumjeseca (razvodna ploča s podijeljenim prstenom), čime se omogućava punjenje radnih komora za vrijeme povećavanja njihovog volumena (u tom dijelu postavljen je usisni dio prstena) i pražnjenje (u tlačni dio prstena) za vrijeme smanjivanja volumena. Protok je moguće mijenjati promjenom ekscentriciteta.

Nešto je složenija izvedba krilne pumpe s lamelama u kućištu i konstantnim protokom, koja se može izvesti kao jednoradna ili višeradna (više komora).

Krilne pumpe odlikuju se relativno tihim i mirnim radom (relativno jednolik protok, tlak, moment). Stupanj korisnog djelovanja iznosi η = 60÷90% [12])



Sl. 9.7 Krilna pumpa s kosim lamelama (nije reverzibilna) [11]*: 1 – stator, 2 – rotor, 3 – lamela, 4 – opruga, 5 – ulazni otvor, 6 – izlazni otvor*

9.4 Klipna pumpa

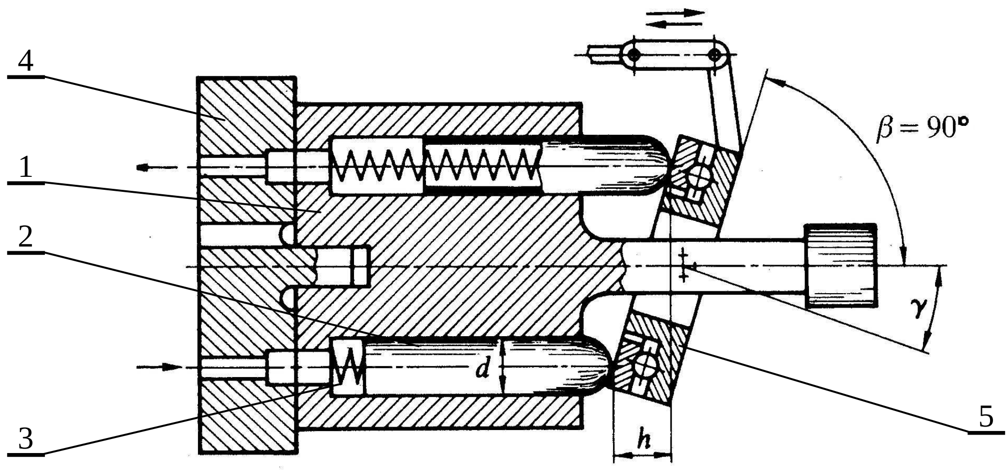
Klipne pumpe se redovito izrađuju s neparnim brojem cilindara (7, 9, 11), jer se tako dobiva ravnomjerniji protok i tlak.

a) Klipno-aksijalna pumpa

Uz relativno miran rad, ove pumpe omogućuju relativno visoke protoke i tlakove uz vrlo visoke brojeve okretaja.

Pumpa s nagibnom pločom

Naziva se još i pumpa s mirujućim ekscentrom ili pločom. Ploča miruje, a postavljena je koso obzirom na os rotacije (*Sl. 9.8*). Ploča je podijeljena na rotirajući i mirujući dio pomoću odgovarajućih ležajeva. Na rotirajući dio ploče vezan je niz (vijenac) klipova. Blok cilindara zakreće se pomoću pogonskog vratila.



Sl. 9.8 Pumpa s nagibnom pločom [11]*: 1- blok (rotor), 2 – klip, 3 – opruga, 4 – upravljačka ploča, 5 – zakretna ploča*

Klip se kreće prema naprijed za vrijeme prve polovice zakreta vratila ($0<\alpha<\pi$, faza usisa), a prema natrag u drugoj polovici zakreta ($\pi<\alpha<2\pi$, faza tlačenja). Za dovod i odvod fluida i ovdje se koristi nepokretna razvodna ploča s dva kanala u obliku polumjeseca (prsten podijeljen u dva dijela spojena na usisni odn. tlačni cjevovod). Prsten je smješten uz otvore cilindara, tako da je usisni dio smješten u prvoj polovici kruga (faza usisa), a tlačni u drugoj (faza tlačenja).

Teoretski protok računa se prema formuli

$$Q = znS_C D_B \mathrm{tg}\gamma = const., \tag{9.8}$$

pri čemu je z broj cilindara, n broj okretaja u jed. vremena, S_C površina presjeka cilindra, D_B promjer bloka cilindara (promjer na kojem su osi cilindara), a γ je kut nagiba ploče.

Za regulaciju protoka potreban je mehanizam za promjenu kuta nagiba ploče kojim se mijenja hod cilindara, a time i protok. Povećanjem kuta ploče u odnosu na os rotacije do vrijednosti 90^0 smanjuje se protok do nule, a daljnjim povećanjem kuta postiže se protok u suprotnom smjeru.

Pumpa s nagibnom osi

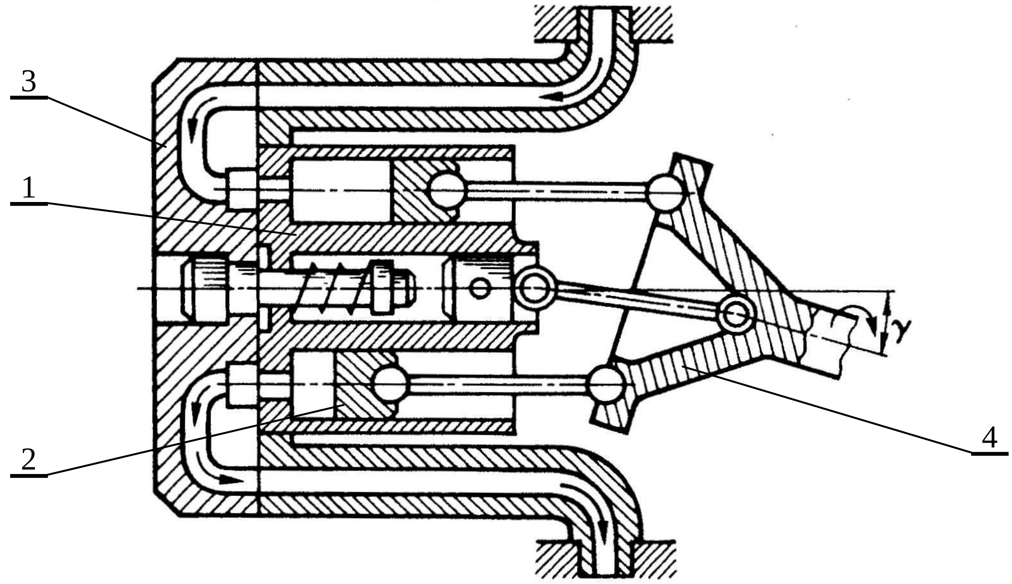
Naziva se još pumpa s kardanskim zglobom (vratilom) ili s rotirajućim ekscentrom (*Sl. 9.9*). I ovdje se zakretanje bloka cilindara ostvaruje pomoću pogonskog vratila. Pogonsko vratilo vezano je i na klipnjače preko veze koja nalikuje na kardansko vratilo. Pomoću te veze ostvaruje se hod klipova naprijed-natrag.

b) Klipno-radijalna pumpa

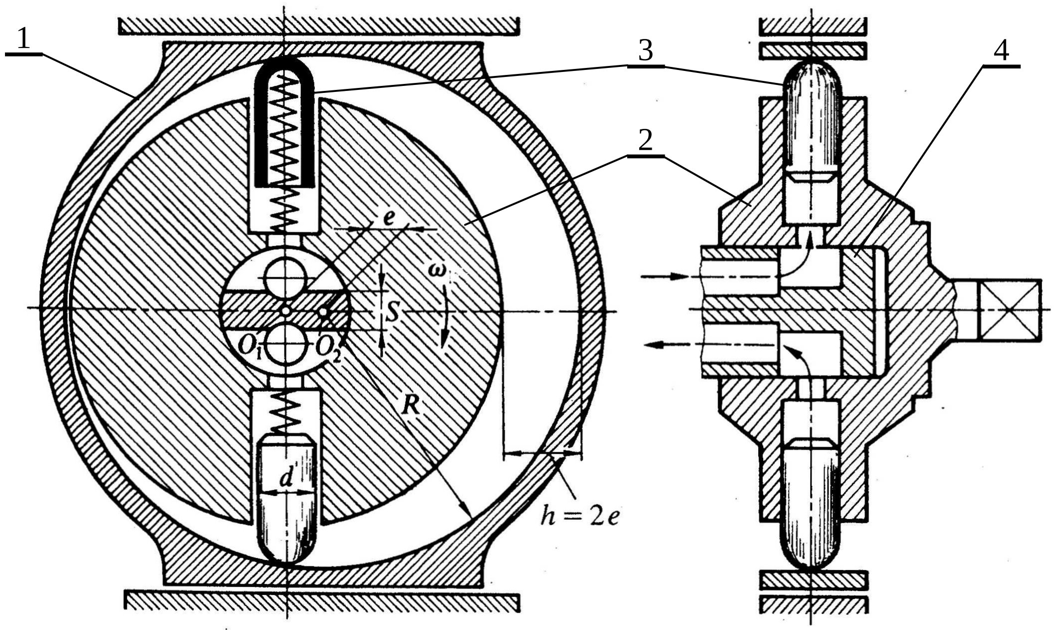
Klipne pumpe omogućavaju dobivanje najviših tlakova (preko 50 MPa).

Pumpa s unutrašnjim djelovanjem

Ova pumpa još se naziva radijalna pumpa s vanjskim ekscentrom (*Sl. 9.10*). Ekscentricitet između statora i rotora (blok cilindara) određuje hod klipova. Tijekom jednog punog okreta rotora svaki klip obavi hod naprijed-nazad (usis i tlačenje). Usisna i tlačna cijev smještene su u sredini rotora i završavaju s nepokretnom cilindričnom razdjelnom pločom koja po obodu ima prstenasti kanal podijeljen na usisni i tlačni dio. Protok se može regulirati promjenom ekscentriciteta.



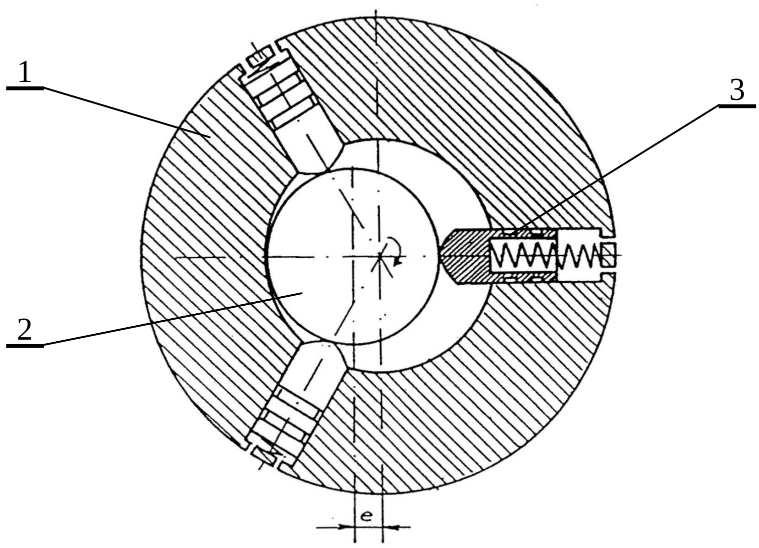
Sl. 9.9 Pumpa s nagibnom osi [11]*: 1 – blok (rotor), 2 – klip, 3 – upravljačka ploča, 4 – kardanski zglob*



Sl. 9.10 Pumpa s unutrašnjim djelovanjem, 2-cilindarska [13]*: 1 – stator, 2 – rotor, 3 – klip, 4 – upravljački prsten*

Pumpa s vanjskim djelovanjem

Ova pumpa naziva se i radijalna pumpa s unutrašnjim ekscentrom (*Sl. 9.11*). Blok cilindara miruje (stator). Klipovi su postavljeni zvjezdasto obzirom na vratilo s brijegom (vratilo s ekscentricitetom). Usisavanje i tlačenje fluida odvija se preko samoradnih nepovratnih ventila ugrađenih u konstrukciju cilindra. Pumpa je pogodna za male protoke i visoke tlakove, a promjena ekscentriciteta i odgovarajuća regulacija protoka nije moguća.



Sl. 9.11 Pumpa s vanjskim djelovanjem – principijelna shema [11]*: 1 – stator, 2 – ekscentrični (koljeničasti) rotor, 3 - klip*

9.5 Regulacija pumpi

Za regulaciju se koriste mehanički, hidraulički ili elektronički regulatori. Prema reguliranoj veličini razlikuju se:

a) Regulatori protoka
b) Regulatori tlaka
c) Regulatori snage

Regulatori se redovito koriste za pumpe relativno velike snage. Načini regulacije se u današnje vrijeme intenzivno razvijaju, a pri tome se nastoji postići održanje visokog stupnja korisnog djelovanja u različitim režimima regulacije. Kad nema regulatora, pumpa uvijek radi punom snagom, a višak fluida se prigušuje i vraća u spremnik, što je energetski nepovoljno.

Regulaciju protoka pomoću promjene ekscentriciteta konstrukcijski je moguće izvesti kod lamelnih pumpi, klipno-aksijalnih pumpi i klipno-radijalnih pumpi s unutrašnjim djelovanjem. Kod svih tipova pumpi protok se može regulirati regulacijom broja okretaja.

Regulacija tlaka djeluje na protok tako da se protok smanjuje s povećanjem tlaka. Regulacija snage treba osigurati da produkt protoka i tlaka (snaga) bude konstantan. Pri povećanju tlaka potrebno je postići odgovarajuće smanjenje protoka.

10 HIDRAULIČKI MOTORI

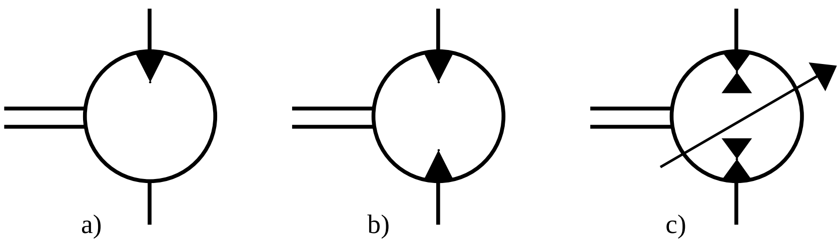
Hidraulički motori (*hidromotori, aktuatori*) su hidraulički izvršni elementi. Oni se dijele na rotacijske motore, cilindre i zakretne motore. Cilindri i zakretni motori imaju pomak ograničen dvjema krajnjim točkama.

10.1 Rotacijski motori

Suprotno pumpama, motori pretvaraju energiju fluida u mehanički rad. Konstrukcija rotacijskih motora i pumpi je u osnovi identična pa se često isti stroj može prema potrebi koristiti kao pumpa ili motor (reverzibilni stroj).

Prema brzini vrtnje razlikuju se *sporohodni* (do 1000 o/min) i *brzohodni* motori. Budući da je snaga motora jednaka umnošku momenta i brzine vrtnje ($P_M = M\omega$), za istu snagu motora mora se uz smanjenje brzine povećavati moment. Zato sporohodni motori često zahtijevaju veliki moment (tzv. LSHT-motori, Low Speed – High Torque).

Primjeri simbola za rotacijski motor dani su na (*Sl. 4.1*). Prvi (a) simbol označava motor koji se okreće uvijek u istom smjeru, a drug (b) je motor koji ima mogućnost rotacije u oba smjera (dvosmjerni ili reverzibilni), što se postiže zamjenom dovoda i odvoda fluida. Slika c) prikazuje motor-pumpu (reverzibilni stroj) promjenljive snage koji se može okretati u oba smjera (dvosmjerni ili reverzibilni). Prelazak iz režima motora u režim pumpe postiže se zakretanjem bubnja, a cijela konstrukcija je prilično komplicirana odn. skupa. Takav uređaj može se zgodno koristiti za dizalice, tako da pri spuštanju pumpa koči teret i pri tome iskorištava rad tog spuštanja.



Sl. 10.1 Primjeri simbola za rotacijski motor a) jednosmjerni, b) reverzibilni, c) podesiva reverzibilna pumpa-motor

Protok radnog fluida kroz motor jednak je

$$Q = \eta_v n V, \tag{10.1}$$

pri čemu n broj okretaja u jedinici vremena, V teoretski radni volumen, a η_v volumetrički stupanj djelovanja motora.

Snaga motora jednaka je umnošku momenta na spojci (vratilu) i kutne brzine vrtnje ($P_M = M\omega$). Za snagu motora vrijedi i izraz

$$P_M = \eta_M n V \Delta p = \eta_m Q \Delta p, \tag{10.2}$$

pri čemu je Δp pad tlaka u motoru, a η_M ukupni stupanj korisnog djelovanja motora

$$\eta_M = \eta_v \eta_m , \tag{10.3}$$

produkt volumetričkog η_v i mehaničkog η_m stupnja korisnog djelovanja (η_m uzima u obzir mehaničke i hidrauličke gubitke snage).

Podjela rotacijskih motora:

1. Zupčasti
    a) s vanjskim ozubljenjem
    b) zupčasto-prstasti
2. Krilni (lamelni)
3. Klipni
    a) klipno-aksijalni (s aksijalno postavljenim ekscentrom)
        – s nagibnom pločom
        – s nagibnom osi
    b) klipno-radijalni (s radijalno postavljenim ekscentrom)
        – s unutrašnjim djelovanjem (vanjskim ekscentrom)
        – s vanjskim djelovanjem (unutrašnjim ekscentrom)

10.1.1 Zupčasti motor

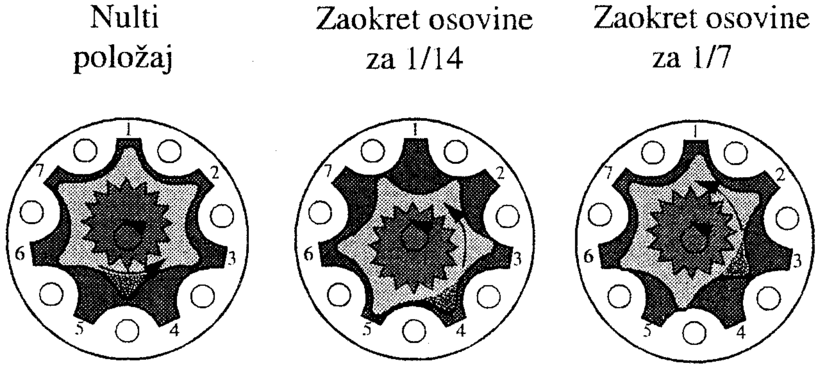
Brzina vrtnje zupčastih motora obično je u rasponu 500 do 3500 o/min, a radni tlakovi do 200 bar [5]. Uz klipno–aksijalni motor, to je jedini brzohodni motor. Zbog velikih gubitaka propuštanja rijetko se izvodi kao LSHT-motor. Za sporije brzine vrtnje može se izvesti kao brzohodni motor s reduktorom. Razina buke povećava se s brzinom vrtnje i tlakom. Zavisno od brtvenih površina, postoje dvije izvedbe:

- s jednim smjerom vrtnje i propisanim priključivanjem visokog i niskog tlaka
- dvosmjerni (reverzibilni) motor, simetrično izveden, s dva identična priključka

Konstrukcija motora *s vanjskim ozubljenjem* je u osnovi ista kao kod zupčaste pumpe (vidi ranije). Brtvene površine kućišta su prednji i stražnji poklopac, kao i površine uz obod zupčanika. Radni fluid pod tlakom kreće se po obodu zupčanika prema priključku niskog tlaka, potiskujući na taj način zube, što dovodi do rotacije zupčanika.

Prstasti motori imaju poseban oblik zuba (trochoidna krivulja) koji osigurava istovremeno brtvljenje svih zuba. Unutrašnji zupčanik uvijek ima jedan zub manje nego stator. Postoje dvije izvedbe:

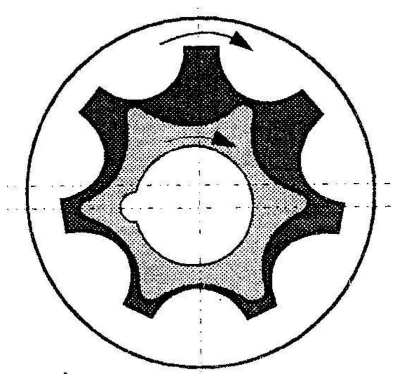
- sporohodna – Orbit motor i
- brzohodna – Gerotor motor



Sl. 10.2 Orbit motor [8]

Orbit motor (*Sl. 4.2*) ima stacionarni vanjski zupčanik i unutrašnji zupčanik – trkač koji se planetarno giba uzimajući u jednom okretu veliki volumen punjenja, što mu daje velik radni moment. Tlačna i usisna strana neprestano se mijenjaju.

Gerotor motor (*Sl. 4.3*) ima ekscentrično postavljen unutrašnji zupčanik i puno manji volumen punjenja. Oba zupčanika rotiraju oko fiksnih, ekscentričnih osi. Predviđen je za veliku brzinu vrtnje uz nešto manji radni moment.



Sl. 10.3 Gerotor motor [8]

10.1.2 Krilni motor

Krilni motor ima male gubitke propuštanja, pa se može koristiti za niske brzine, već od 10 o/min. Maksimalni radni tlak iznosi oko 150 bar [5]. Može se izvesti s promjenljivim volumenom.

10.1.3 Klipni motor

Koriste se klipno-aksijalni i klipno radijalni motori. Radni volumen ovih motora obično je u granicama $V = 10\text{-}80\ \mathrm{cm}^3$, a mogu se izvesti s promjenljivim radnim volumenom. Broj okretaja iznosi $n = 0{,}5 \div 3000$ o/min, maksimalni radni tlak prelazi 300 bar [5], a mogu razviti izrazito velik moment (do $M = 32$ kNm).

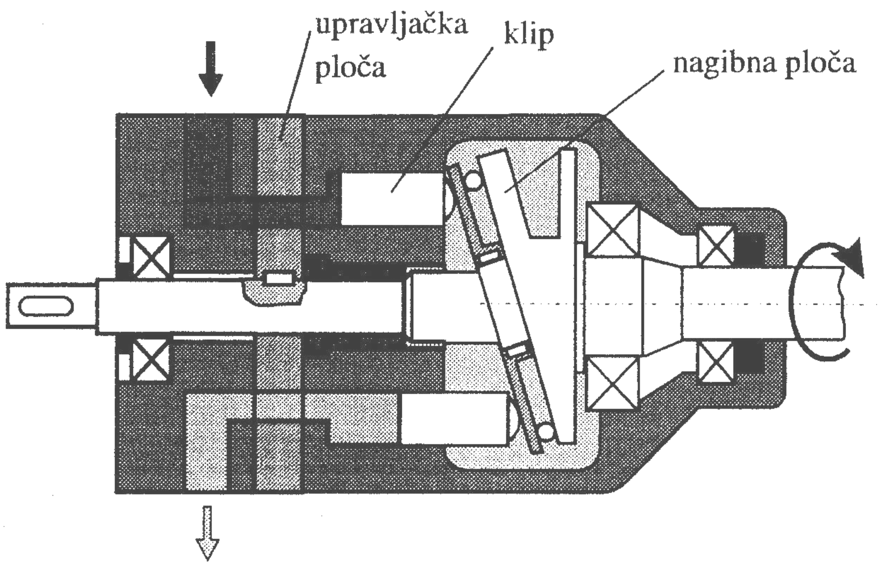
a) Klipno-aksijalni motor

Klipno-aksijalni motori (s aksijalnim ekscentrom) izvode se s konstantnim ili promjenljivim volumenom punjenja (ekscentricitetom). Postoje dvije osnovne konstrukcije, motor *s nagibnom pločom* i *s nagibnom osi*.

Motor s nagibnom pločom

Za razliku od pumpe, izvedba s konstantnim nagibom ploče obzirom na os rotacije (s konstantnim volumenom punjenja) ima nagibnu ploču i razvodnu ploču koje se okreću, dok blok cilindara miruje (*Sl. 4.4*). Radni fluid kroz razvodnu ploču ulazi u cilindre potiskujući klipove koji pritiskom na nagibnu ploču izazivaju njenu rotaciju. Ovaj tip motora ima nešto manji broj okretaja i relativno visok stupanj korisnog djelovanja.

Klipno aksijalni motor *sa zakretnom pločom* (promjenljiv volumen punjenja) po izvedbi nalikuje pumpi sa zakretnom pločom (vidi ranije). Kao i kod pumpe, blok cilindara rotira dok nagibna ploča i razvodna ploča miruju. Gubici trenja su značajni, posebno pri malim brzinama vrtnje.



Sl. 10.4 Klipno-aksijalni motor s nagibnom pločom – konstantni nagib [8]

Motor s nagibnom osi

Ova konstrukcija motora s kardanskim zglobom (vratilom) omogućava relativno velik volumen punjenja (i velik zakretni moment). Promjena volumena punjenja može se jednostavno realizirati promjenom kuta nagibne osi.

b) Klipno-radijalni motor

Klipno-radijalni motori izvode se kao motori *s unutrašnjim djelovanjem* i *s vanjskim djelovanjem*. Kao i klipno-radijalne pumpe s unutrašnjim djelovanjem, motore s unutrašnjim djelovanjem može se izvesti s promjenljivim volumenom punjenja (promjenljivim ekscentricitetom). Općenito klipno-radijalni motori mogu imati vrlo veliki volumen punjenja (zakretni moment).

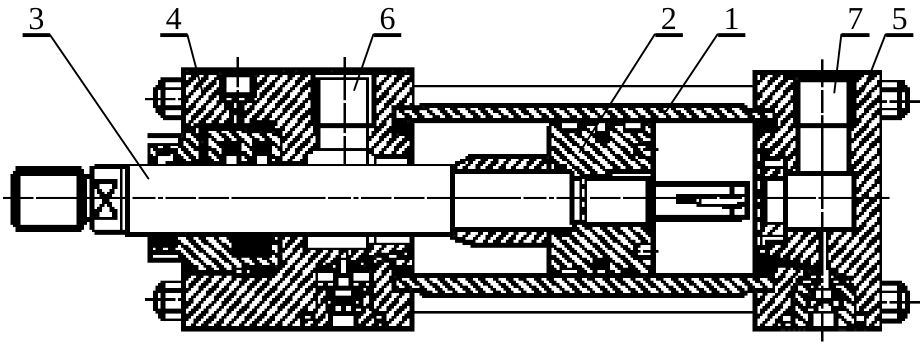
10.2 Hidraulički cilindri

Hidraulički cilindri ne razlikuju se bitno od pneumatskih cilindara. Zbog *većih tlakova* i sila moraju biti robusnije konstrukcije, a povećan je i problem brtvljenja. Obzirom da je radni medij ulje, pojavljuje se i *problem curenja* ulja prodrlog kroz brtve, pa je potrebno predvidjeti odvod tog ulja. Također, prilikom pražnjenja cilindra mora se ulje odgovarajućim vodovima *vratiti u spremnik*. Konačno, prije puštanja u pogon potrebno je cijelu hidrauličku instalaciju *odzračiti*. Zato hidraulički cilindri imaju dva otvora (po jedan na prednjoj i stražnjoj strani) za odzračivanje. Kroz te otvore odzračivanje se vrši pomoću vijka ili automatskog ventila za odzračivanje.

Dijelovi cilindra (*Sl. 10.5*):
– plašt cilindra
– klip
– klipnjača
– poklopci (prednji – kroz koji prolazi klipnjača i stražnji)
– priključci za ulje

Hidraulički cilindri koriste se kod alatnih strojeva (stezanje izratka, gibanje izratka i alata), u uređajima za transport (podizanje, utovarivanje), pokretnim strojevima

(traktori, bageri itd.), zrakoplovima (pomicanje stajnih trapova, zakrilaca), brodovima (zakretanje kormila, krila, elisa) itd.



Sl. 10.5 Dvoradni cilindar [4]*: 1 – plašt, 2 – stap, 3 – klipnjača, 4 – prednji poklopac, 5 – stražnji poklopac, 6-7 – priključci za ulje*

Cilindri mogu biti *jednoradni i dvoradni*. Svi hidraulički cilindri imaju *oba priključka*, kod jednoradnih cilindara stražnji priključak služi za odvod prodrlog ulja.

Kod jednoradnih cilindara ulje pod tlakom dovodi se samo s jedne strane klipa koji vrši koristan rad samo u jednom smjeru. Povratno kretanje ostvaruje se oprugom ili težinom tereta. Za upravljanje jednoradnim cilindrom koriste se razvodnici 3/2.

Dvoradni cilindri vrše koristan rad u oba smjera. Za upravljanje dvoradnim cilindrom koriste se razvodnici 4/2 ili 5/2. Kod cilindara s jednostranom klipnjačom površina prednje strane klipa veća je od površine stražnje strane klipa za iznos površine presjeka klipnjače. Zato je prilikom izvlačenja klipa brzina manja, a sila veća nego u povratnom hodu. Cilindri kod kojih je odnos prednje i stražnje površine 2:1 (isti je i odnos sila, a obratan odnos brzina) nazivaju se *diferencijalni cilindri*. Cilindri s dvostrukom (prolaznom) klipnjačom imaju jednaku prednju i stražnju površinu, tako da su sile i brzine jednake u oba smjera.

Brzina kretanja klipa v jednaka je

$$v = \eta_v Q/S, \qquad (10.4)$$

pri čemu je Q protok radnog fluida kroz priključni cjevovod, S aktivna površina klipa, a η_v volumetrički stupanj djelovanja cilindra ($\eta_v \approx 0{,}95$). Sila klipnjače F jednaka je

$$F = \eta_m S \Delta p, \qquad (10.5)$$

pri čemu je Δp raspoloživi pad tlaka, a η_m mehanički stupanj korisnog djelovanja cilindra kojim se uzimaju u obzir mehanički i hidraulički gubici (približna vrijednost mu je $\eta_m \approx 0{,}75 \div 0{,}95$). Snaga cilindra P jednaka je

$$P = Fv = \eta_C Q \Delta p, \qquad (10.6)$$

pri čemu je $\eta_C = \eta_v \eta_m$ ukupni stupanj korisnog djelovanja cilindra ($\eta_C \approx 0{,}7 \div 0{,}9$).

Primjer 1

Za dvoradni hidraulički cilindar s jednostrukom klipnjačom poznati su sljedeći podaci: promjer cilindra $D = 100$ mm; promjer klipnjače $d = 56$ mm; brzina izvlačenja klipnjače $v_1 = 0,1$ m/s; raspoloživi pad tlaka $\Delta p = 15$ MPa; volumetrički stupanj djelovanja $\eta_v = 0,96$; mehanički stupanj djelovanja $\eta_m = 0,95$. Odredite potrebni protok pumpe Q, povratnu brzinu klipa v_2 pri tom protoku, te maksimalne sile na klipnjači F_1 i F_2 u oba smjera.

Rješenje

$$S_1 = \frac{D^2\pi}{4} = 78,54\, cm^2$$

$$S_2 = \frac{(D^2 - d^2)\pi}{4} = 53,91\, cm^2$$

$$Q = \frac{v_1 S_1}{\eta_v} = 0,8181\, \text{l/s}$$

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} = 0,146\, m/s$$

$F_1 = \eta_m S_1 \Delta p = 112$ kN

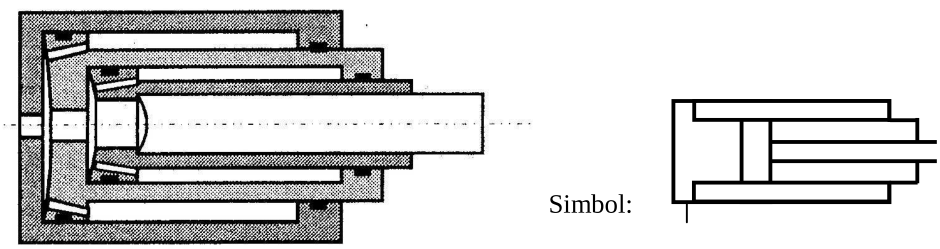
$F_2 = \eta_m S_2 \Delta p = 76,8$ kN

Moguć je niz standardnih i specijalnih izvedbi cilindara, a za izbor se koriste dijagrami. Kriteriji za odabir cilindra su

– potrebna sila
– potreban hod
– potrebna brzina
– konstrukcija cilindra (učvršćenje cilindra, spoj klipnjače, priključci)

Kod cilindra *s prigušenjem* u krajnjem položaju smanjuje se pri kraju hoda presjek kanala za odvod ulja (preko prigušnog ventila), čime se usporava gibanje klipa. Ovakvo kočenje je neophodno pri brzinama klipa većim od 0,1 m/s.

Teleskopski cilindar (*Sl. 4.5*) koristi se kad je potreban dugi hod cilindra. Izvedba teleskopskog cilindra sa *stupnjevitim* (slijednim) izvlačenjem osigurava da se najprije do kraja izvuče najširi cilindar, pa sljedeći po širini itd. Kod izvedbe s *jednakokoračnim* izvlačenjem izvlače se svi cilindri istovremeno.



Sl. 10.6 Teleskopski cilindri [8]

Tandem cilindar (dva cilindra i dva klipa na istoj klipnjači) omogućavaju postizanje velike sile uz ograničeni promjer cilindra.

Tipovi učvršćenja cilindara

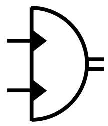
– s nogama
– s prirubnicom (sprijeda/straga, nepomična/okretna)
– s rukavcem

Postoji više standardnih spojeva i odgovarajućih završetaka klipnjače.

Za relativno duge cilindre (hod/promjer klipnjače >10)potrebno je izvršiti proračun klipnjače na izvijanje.

10.3 Zakretni motori

Zakretni motori imaju ograničen kut zakreta, a zakretno kretanje ostvaruju direktno ili indirektno. *Direktno* zakretanje ostvaruje se pomoću krila (poput krilnog motora s jednim krilom) unutar cilindra s fiksnom radijalnom pregradom između tlačnog i usisnog dijela. Maksimalni zakret takvog motora iznosi oko 300^0. *Indirektno* zakretanje ostvaruje se pomoću cilindra preko zubne letve (ozubnice) i zupčanika uz maksimalni zakret oko 720^0.

Simbol zakretnog motora: 

11 VENTILI

Hidraulički ventili dijele se na:

- razvodnike
- nepovratne ventile
- tlačne ventile
- protočne ventile

11.1 Razvodnici

Princip rada hidrauličkih i pneumatskih razvodnika gotovo je identičan, a simboli su praktički isti (koriste se simboli prema normi DIN ISO 1219). U hidraulici se ulazni priključci obično označavaju slovima P (tlačni – lijevo), R (ili T za odvod odn. spremnik – desno), izlazni (radni) priključci slovima A, B, C, upravljački slovima X ili Y, a pomoćni (za prodrlo ulje) slovom L.

Ovdje se pod razvodnikom podrazumijeva *digitalno pokretani razvodnik* kod kojeg se koriste samo krajnji položaji 'otvoreno' ili 'zatvoreno'. Postoje i kontinuirano pokretani razvodnici (proporcionalni i servo-ventili) koji između dva krajnja položaja kontinuirano poprimaju neki položaj uz odgovarajuće prigušno djelovanje.

Kvalitetu razvodnika karakteriziraju unutrašnji otpor (pad tlaka) i propuštanje (koji trebaju biti što manji), te brzina rada (frekvencija uključivanja i isključivanja – treba biti što veća). Općenito (kao i za svaki drugi ventil), radna karakteristika razvodnika ima takav oblik da se otpor (pad tlaka) povećava s povećanjem protoka kroz razvodnik.

Osnovne karakteristike hidrauličkih razvodnika su:

- konstrukcija
- nazivna veličina
- broj radnih položaja
- broj hidrauličkih priključaka
- način aktiviranja

Uz ove podatke od interesa su i nazivni protok, maksimalni radni tlak i materijal razvodnika, naročito brtvi.

Oznaka broja priključaka i radnih položaja obično se piše ispred riječi razvodnik (npr. 4/3 razvodnik označava razvodnik s 4 priključka i 3 radna položaja).

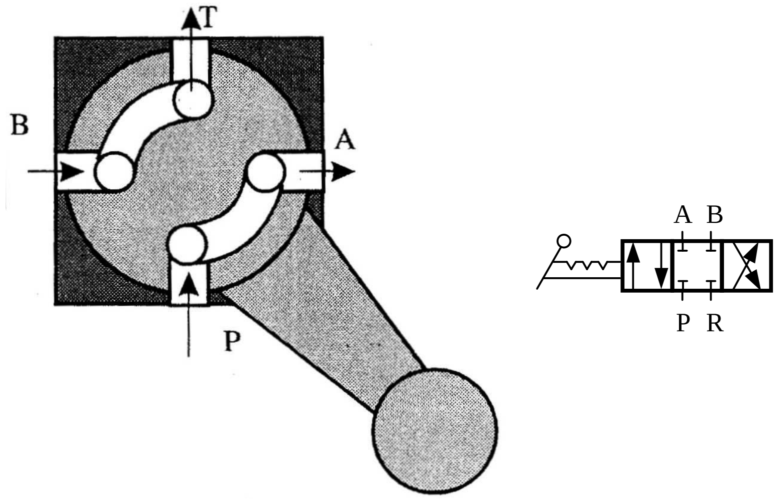
Prema konstrukciji razvodnici se dijele na *klipne*, *pločaste* i *razvodnike sa sjedištem*. Najčešće se koriste klipni razvodnici. *Razvodnici sa sjedištem* nepropusno zatvaraju protok pomoću pladnja koji ima oblik kugle, konusa, a rjeđe tanjurasti. Obično se izvode kao 2/2 i 3/2 razvodnici, a njihovim kombiniranjem dobivaju se razvodnici s većim brojem priključaka. Relativno su neosjetljivi na nečistoću i imaju mali hod pokretanja. Nije lako postići tlačno uravnoteživanje, tj. kompenzaciju sile potrebne za prebacivanje.

Pločasti razvodnici (*Sl. 3.1*) koriste se za visoke tlakove, a aktiviraju se isključivo ručno. Mogu imati najviše tri razvodna položaja.

Nazivna veličina izražava se *nazivnim promjerom* (NP) priključaka.

Način aktiviranja (neposredni) može biti *ručni*, *opružni*, *hidraulički*, *pneumatski* i *elektromagnetski*. Razvodnici s elektromagnetskim aktiviranjem imaju i dodatno ručno aktiviranje zbog sigurnosti i održavanja. Elektromagneti mogu biti izmjenični i istosmjerni. Izmjenični su izloženi strujnom udaru u času uključivanja i pregore ako

se pri aktivaciji kotva potpuno ne uvuče. Istosmjerni podnose proizvoljni položaj kotve i omogućavaju gotovo dvostruki broj uključivanja u satu. Osnovni simboli načina aktiviranja prikazani su na *Sl. 11.2*.



Sl. 11.1 Pločasti 4/3 razvodnik [8]



Sl. 11.2 a) ručno b) opružno, c) hidraulički, d) pneumatski, e) elektromagnetski

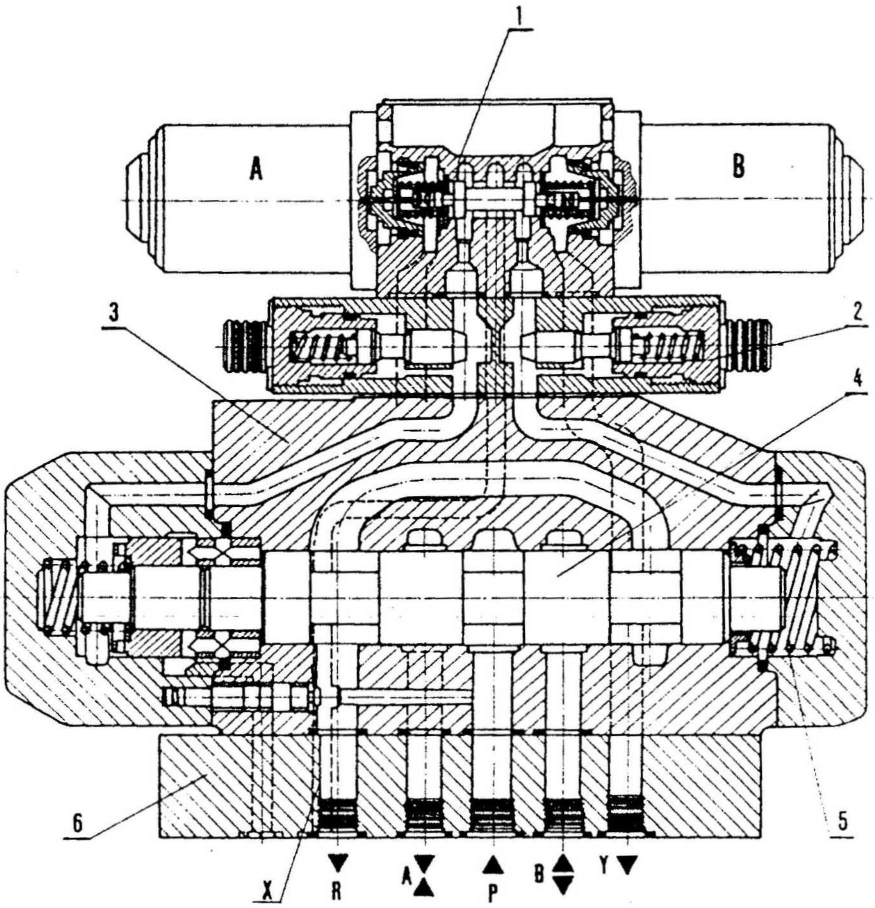
Zadani položaj razvodnog klipa može se pozicionirati i održavati:

- oprugama za centriranje koje vraćaju klip u početni položaj kad razvodnik nije aktiviran,
- mehaničkim uskočnikom ili kuglicom s oprugom koji održavaju postojeći položaj do novog aktiviranja,
- blokiranjem tekućine ispred čela razvodnog klipa (hidrauličko držanje).

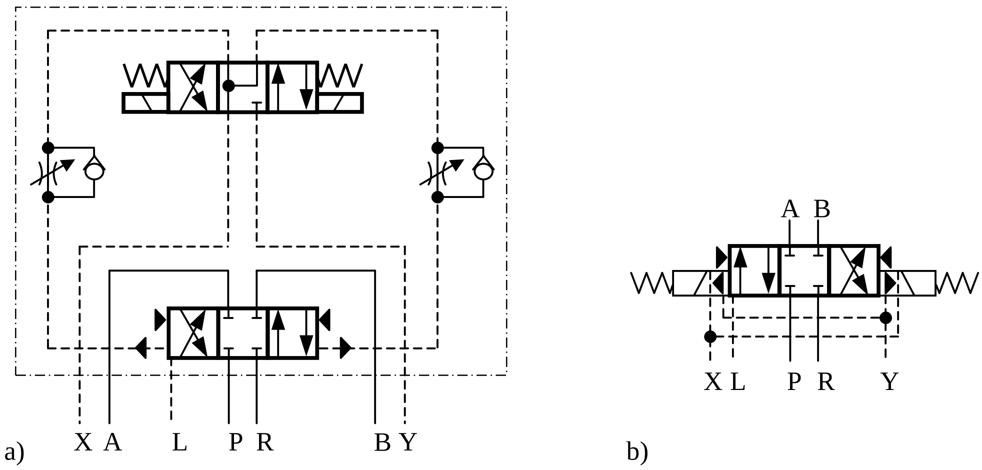
Hidrauličko aktiviranje može biti *neposredno* (direktno) i *posredno* (indirektno). Posredno aktiviranje (*predupravljani* ili dvostupanjski klipni razvodnik – *Sl. 11.3*) koristi se kad su za prebacivanje potrebne relativno velike sile (za nazivne promjere veće od NP 10). Tada glavnim razvodnikom upravlja manji razvodnik (pilot-razvodnik). Hidraulička shema i simbol predupravljanog klipnog razvodnika prikazani su na *Sl. 11.4*.

Direktno upravljani razvodnik (upravljački razvodnik, pilot-razvodnik) upravlja pomakom glavnog razvodnog klipa (koji upravlja npr. dvoradnim hidrauličkim cilindrom tako da se priključci A i B spoje na cilindar). Na slici se upravljački razvodnik aktivira pomoću elektromagneta i pomiče u lijevi ili desni položaj. U tom položaju on dovodi tlak, a time i protok medija na jednu stranu glavnog razvodnika, dok se istovremeno medij odvodi sa suprotne strane glavnog razvodnika, prebacujući na taj način glavni razvodnik u aktivni položaj. Npr. pomak pilot razvodnika u desni položaj prebacuje glavni razvodnik u lijevi položaj, dovodeći tlak i protok na radni priključak A, te istodobno rasterećujući priključak B koji preuzima odvod medija. Napajanje pilot-razvodnika može se izvesti *eksterno* putem zasebnog kanala X (kao na slici) ili *interno* – putem zajedničkog kanala za napajanje P. Odvod medija odvija

se eksterno putem zasebnog kanala Y (kao na slici) ili interno – putem zajedničkog odvodnog kanala R.



Sl. 11.3 Predupravljani razvodnik s tlačnim centriranjem [5]*: A-B elektromagneti, 1 – upravljački razvodnik, 2 – prigušnica, 3 – glavni razvodnik, 4 – razvodni klip, 5 – veći klip, 6 – priključna ploča*



Sl. 11.4 Predupravljani razvodnik a) shema b) simbol

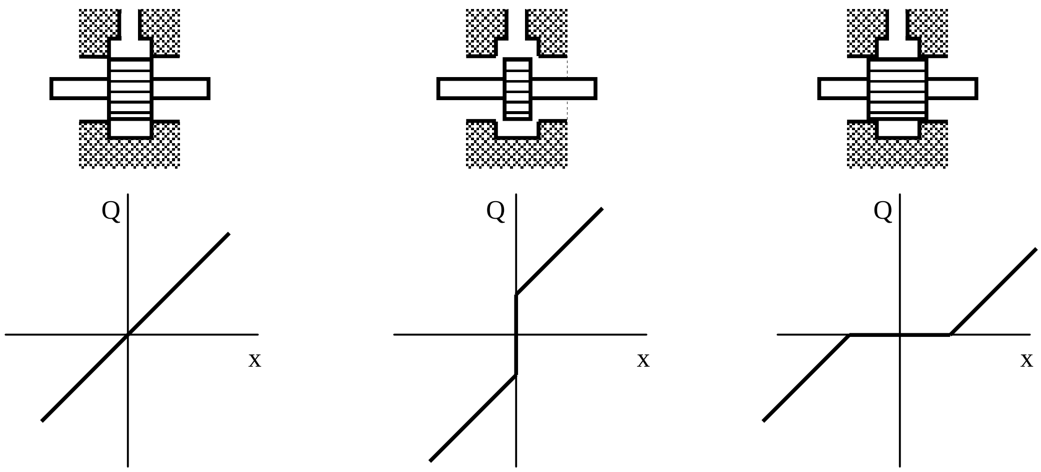
Razvodnik prikazan na slici centrira se tlačno. Lijevi klip ima najmanju površinu, desni srednju, a najveću površinu ima klizna čahura za centriranje smještena oko lijevog klipa. Tlak doveden na lijevi klip prebacuje čahuru i klip u krajnji desni

položaj, a tlak doveden na desni klip prebacuje čahuru i klip u krajnji lijevi položaj. Nakon isključivanja elektromagneta, pod djelovanjem opruge prebacuje se pilot razvodnik u neutralni (srednji) položaj dovodeći pod tlak čahuru i oba kraja glavnog razvodnog klipa. Razvodnik tada prelazi u centralni položaj tako da čahura prijeđe u krajnji desni položaj a klip se pomakne ulijevo dok ne nalegne na čahuru. U tom položaju blokira se protok kroz radne kanale A i B (ako su oni spojeni na hidraulički cilindar, blokira se i položaj tog cilindra).

Brzina premještanja glavnog razvodnog klipa ovisi o veličini protoka kroz pilot-razvodnik. Ugradnjom prigušnice između pilot-razvodnika i glavnog razvodnika prema slici, može se podešavati brzina premještanja glavnog razvodnog klipa, kako bi se osigurala stabilnost rada.

Klipni razvodnici u principu imaju uravnotežen tlak (kompenzacija sile za prebacivanje) i velik hod prebacivanja. Izvedba je jednostavna, a uvijek je prisutan izvjestan protok propuštanja koji se umanjuje izradom prstenastih utora u klipu. Zbog malih zazora osjetljivi su na nečistoću (habanje).

Termin *prekrivanje klipa* označava odnose širina klipa i strujnih otvora razvodnika. *Sl. 11.5* prikazuje moguće slučajeve prekrivanja i promjenu protoka Q kroz strujni otvor zavisno od položaja x klipa. Kod pozitivnog prekrivanja (klip je širi od otvora) svi su priključci zatvoreni za vrijeme preklapanja razvodnika, pa se koristi npr. za držanje tereta u zadanoj poziciji (minimalno propuštanje odn. protok za vrijeme preklapanja). Kod negativnog prekrivanja (klip je uži od otvora) svi su priključci kratkotrajno povezani za vrijeme preklapanja – izbjegavaju se tlačni udari. Nulto prekrivanje (ista širina klipa i otvora) idealno bi trebalo dati konstantnu ovisnost protoka kroz razvodnik o položaju klipa.

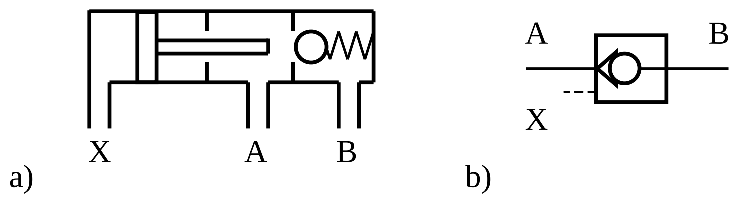


Sl. 11.5 a) nulto prekrivanje b)negativno prekrivanje c)pozitivno prekrivanje

11.2 Nepovratni ventili

Dozvoljavaju protok samo u jednom smjeru – poput diode u elektronici. Pladanj ventila može imati oblik kugle, konusa, tanjura ili čahure. Ventil može biti neopterećen ili opterećen (s oprugom).

Ventil s hidrauličkim deblokiranjem *Sl. 11.6* normalno dozvoljava protok od A prema B. Međutim, kad se priključak X dovede pod tlak, omogućava se protok u suprotnom smjeru (od B prema A). Ovaj ventil omogućava blokiranje i deblokiranje željenog položaja (npr. kod hidrauličke dizalice za automobil).



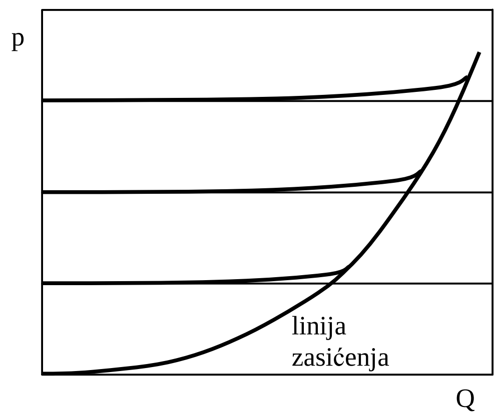
Sl. 11.6 Nepovratni ventil s hidrauličkim deblokiranjem a) princip rada, b) simbol

11.3 Tlačni ventili

Tlačni ventili utječu na tlak u sustavu ili dijelu sustava – oni su izvršni elementi za upravljanje i za regulaciju tlaka. Prema funkciji dijele se na:

a) ventile za ograničavanje tlaka,
b) redoslijedne ventile i
c) redukcijske ventile

Poželjna bi bila horizontalna karakteristika tlačnih ventila (konstantni tlak bez obzira na protok). Međutim, pad tlaka na ventilu umjereno se povećava s povećanjem protoka kroz ventil (*Sl. 11.7*).



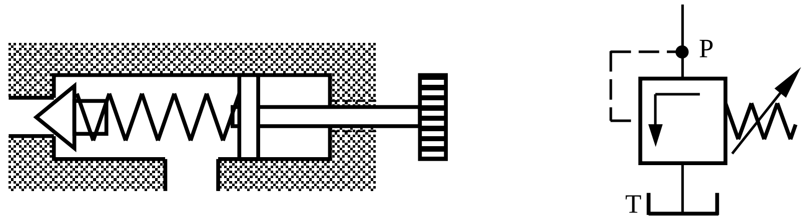
Sl. 11.7 Karakteristika ventila za ograničenje tlaka

Ventili za ograničavanje tlaka

Osiguravaju da tlak u sustavu ne prijeđe maksimalno dopuštenu vrijednost. Koriste se kao sigurnosni ventili (za zaštitu od prekomjernog tlaka), kao kočni ventili (za zaštitu od tlačnih udara koji nastaju npr. prilikom zatvaranja razvodnika) ili kao ventili za protudržanje. Potrebni su i prisutni u svim hidrauličkim sustavima, tipično se postavljaju na izlazu pumpe, za zaštitu pumpe i sustava od prekomjernog tlaka.

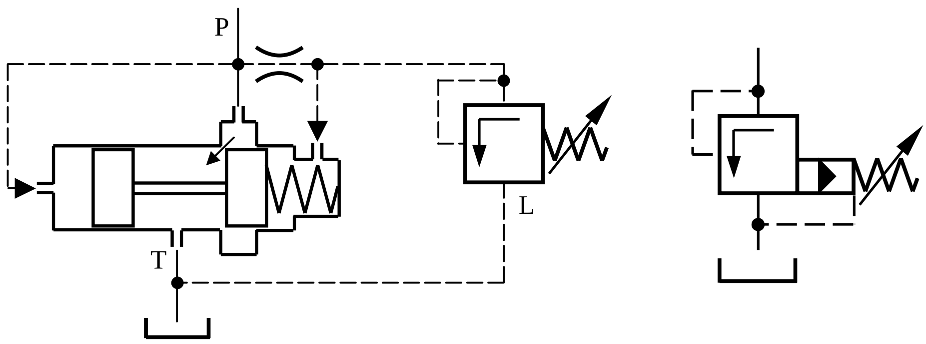
Ventil za ograničavanje tlaka (*Sl. 11.8*) u normalnom je položaju zatvoren. Na ventilu se skraćivanjem/produžavanjem opruge namjesti željeni maksimalni tlak pri kojem će pritisak na pladanj ventila svladati silu u opruzi, gurnuti pladanj i na taj način otvoriti ventil. Tlak otvaranja veći je od tlaka zatvaranja ventila za 10-15% (histereza).

U ventile za ograničenje tlaka često se ugrađuju prigušni klipovi ili prigušnice za smanjenje brzine zatvaranja (brzo otvaranje i usporeno zatvaranje). Time se sprečavaju štete od tlačnog udara kakvi se javljaju npr. ako se zatvaranjem ventila trenutačno obustavi protok prema nekom potrošaču.



Sl. 11.8 Ventil za ograničenje tlaka (direktni)

Ventil za ograničenje tlaka izvodi se kao direktni do nazivnog tlaka NP 10, dok se za veće tlakove (zbog povećanih sila) koriste indirektno upravljani ventili. Razvodnik 2/2 na *Sl. 11.9* ima funkciju indirektno upravljanog ventila za ograničenje tlaka. U normalnom položaju razvodnik je zatvoren. Kad se zbog prekoračenja tlaka otvori vodeći (pilot) ventil za ograničenje tlaka, opada tlak na desnoj strani razvodnika zbog prigušnice, pa se razvodnik prebacuje u aktivni položaj (otvara se). Nakon zatvaranja vodećeg ventila, uspostavlja se isti tlak s obje strane razvodnika (ukupna sila tlaka jednaka nuli), pa opruga prebacuje razvodnik u normalni (zatvoreni) položaj, a prigušnica pri tom usporava prebacivanje.

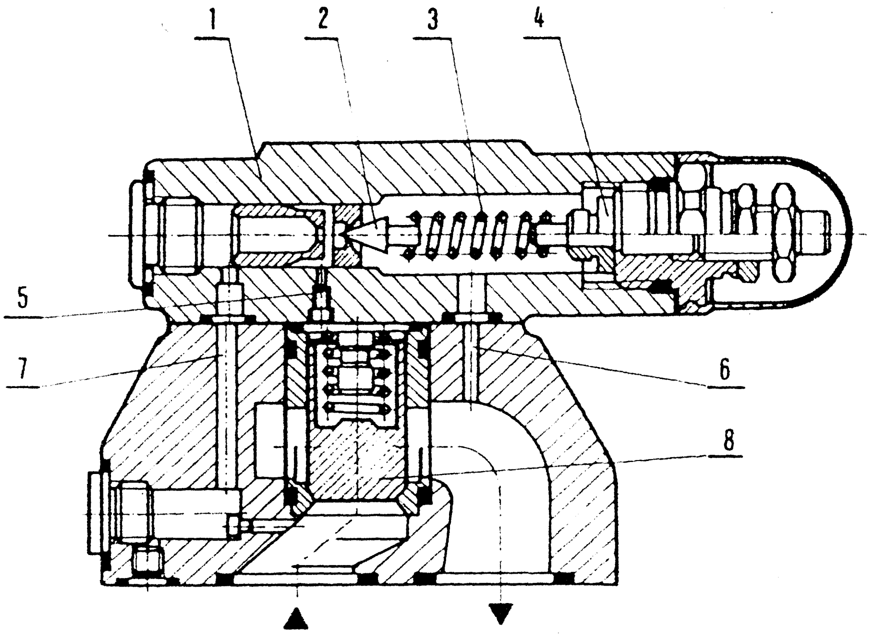


Sl. 11.9 Shema funkcioniranja i simbol ventila za ograničenje tlaka s indirektnim upravljanjem

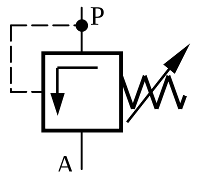
Sl. 11.10 prikazuje jednu izvedbu ventila za ograničenje tlaka s indirektnim upravljanjem. Pilot ventil smješten je na gornjoj strani i napaja se kroz prigušnicu i kanal 7. Kad u komori na lijevoj strani pilot ventila tlak poraste dovoljno da svlada silu u opruzi, pilot ventil se otvara (udesno). Zbog spomenute prigušnice pada tlak u komori, a komora je preko druge prigušnice (radi usporavanja odziva) povezana s gornjom stranom glavnog ventila. Smanjenje tlaka na gornjoj strani glavnog ventila izaziva otvaranje tog ventila (pomak prema gore).

Redoslijedni ventili

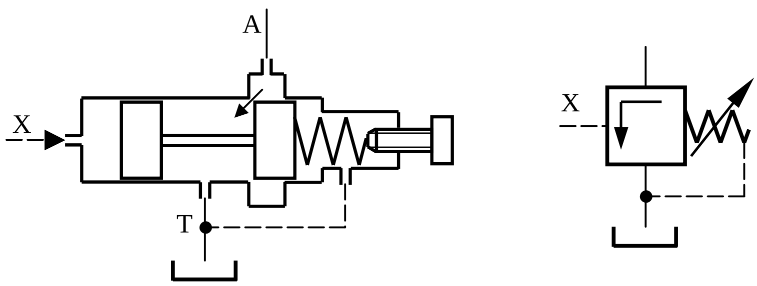
Još se nazivaju slijedni, priključni, tlačni priključni ili uključni/isključni ventili. Po konstrukciji i djelovanju nalikuju ventilima za ograničenje tlaka. Njihova funkcija je da pri određenom nivou tlaka uključuju/isključuju iz rada dio hidrauličkog sustava, tako da uključe/isključe njegovo napajanje. Moguć je niz rješenja u kojima se kombinira direktno ili indirektno upravljanje, s upravljanjem putem tlaka (vanjskog ili unutrašnjeg) ili daljinskim. Isključni ventil upravljan vanjskim tlakom praktički se ne razlikuje od ventila za ograničenje tlaka. Primjeri nekoliko varijanti ovih ventila prikazani su na *Sl. 11.11*.



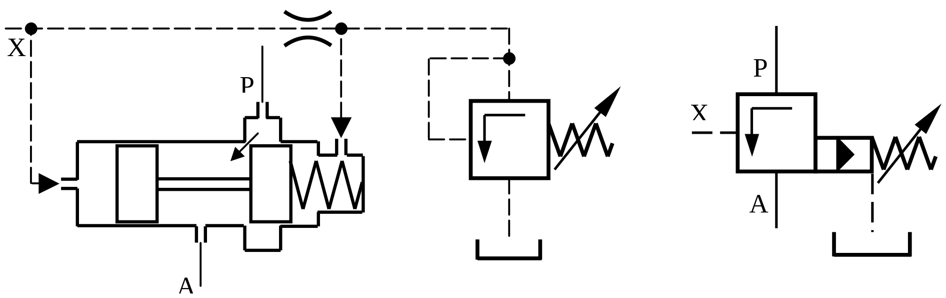
Sl. 11.10 Posredni ventil za ograničenje tlaka [5]*: 1 – kućište, 2 – upravljački ventil, 3 – opruga, 4 – vijak za podešavanje, 5 – prigušnica za usporavanje gl. klipa, 6-7 – priključci upravljačkog ventila, 8 – gl. klip*



a) simbol za uključni ventil s direktnim upravljanjem vanjskim tlakom



b) isključni ventil s direktnim daljinskim upravljanjem – shema i simbol



c) uključni ventil s indirektnim daljinskim upravljanjem (shema i simbol)

Sl. 11.11 Primjeri uključnih/isključnih ventila

Uključni ventil (direktni) na slici a) nalik je ventilu za ograničenje tlaka. Otvara se kad radni tlak (P) postane dovoljan da sila tlaka na savlada podešenu silu opruge. Isključni ventil na sl. b) upravljan je direktno daljinski – tlačnim signalom (X).

Na slici c) prikazan je daljinski (X) indirektno upravljani ventil. Tlačni signal X otvara upravljački (pilot) ventil i uspostavlja protok kroz prigušnicu. Tako se na prigušnici smanjuje razina upravljačkog tlaka, što izaziva (trenutačno) prebacivanje glavnog razvodnika u aktivni položaj. Pri tome je pilot ventil i dalje otvoren. Kada se isključi daljinski upravljački signal (tlak X), zatvara se pilot ventil i izjednačava tlak na oba čela glavnog razvodnog klipa. Glavni razvodnik se tada pod utjecajem opruge prebacuje u neaktivni položaj, a prigušnica pri tome usporava gibanje razvodnog klipa.

Redukcijski ventili

Nazivaju se još i ventili za regulaciju tlaka. Njihov zadatak je održavanje približno konstantne zadane razine sniženog izlaznog tlaka uz povišen ulazni tlak. Izlaznim tlakom napaja se aktuator, tako da se taj tlak namješta sukladno potrebama akturatora. Zato se izlaznim tlakom upravlja s radne strane (od akturatora). Redukcijski ventil je u normalnom položaju otvoren. Ventil se smješta uz aktuator, tako da ograničava njegovu maksimalnu silu. U cilju povećanja stabilnosti regulacije tlaka, često se pomicanje ventila usporava ugradnjom prigušnica. Postoje dva tipa ovih ventila:

– dvograni i

– trograni

Sl. 11.12 prikazuje nekoliko varijanti tlačnih regulacijskih ventila. Razvodni i pilot ventili za vrijeme normalnog rada ne nalaze se u svojim krajnjim položajima, već u međupoložaju između tih krajnjih položaja, u kojem imaju prigušno djelovanje.

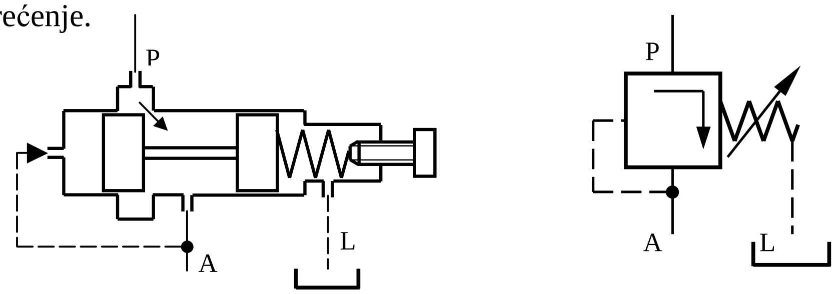
Sl. a) prikazuje dvograni direktno upravljani regulacijski ventil kod kojeg je izlazni tlak (A) u negativnoj povratnoj vezi s propuštanjem ventila (povećanje tlaka pojačava prigušno djelovanje). Ventil održava zadani tlak tako da je sila tog tlaka na čelo klipa u ravnoteži sa silom podešenom na opruzi.

Trograni redukcijski ventil predstavlja kombinaciju redukcijskog i sigurnosnog ventila – u slučaju prekomjernog tlaka rasterećuje granu tako da se izlazni priključak spoji sa spremnikom (T). Na sl. b) prikazan je direktno upravljani trograni redukcijski ventil. Prekrivanja klipova izvedena su tako da u su u normalnom položaju povezani priključci P i A, uz prigušno djelovanje, dok je priključak T zatvoren. Prekomjerni tlak na priključku A prebacuje ventil u krajnji položaj u kojem je priključak P zatvoren, a direktno se povezuju priključci A i T.

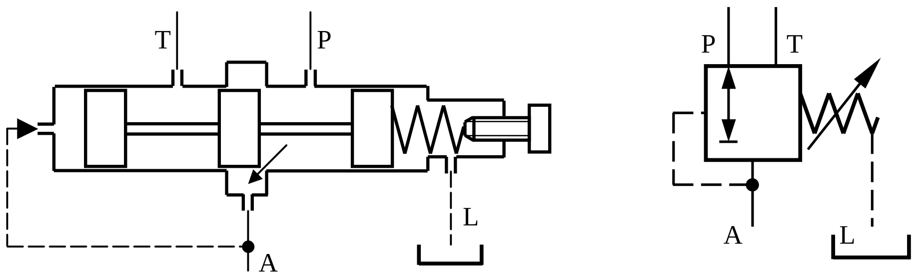
Sl. c) prikazuje indirektno upravljani trograni redukcijski ventil. Regulacijsku funkciju preuzima pilot ventil koji upravlja protokom kroz prigušnicu. Povećanje tog protoka smanjuje protusilu na čelu glavnog razvodnika. Smanjenje protusile dovodi glavni klip u položaj većeg prigušivanja. Potpuno otvaranje pilot ventila dovodi glavni ventil u krajnji položaj u kojem se rasterećuje priključak A.

Ventil za regulaciju diferencijalnog tlaka odn. razlike tlaka *Sl. 11.13* održava konstantnu razliku tlaka. Na elementu koji, poput podesive prigušnice na slici, ima promjenljiv hidraulički otpor (npr. razvodnik), može se pomoću ventila za regulaciju diferencijalnog tlaka osigurati konstantan pad tlaka (tlačna vaga). Ventil za regulaciju

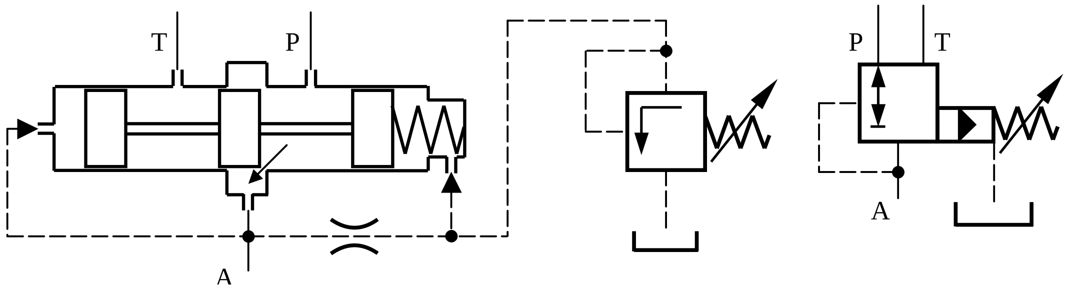
diferencijalnog tlaka može biti i trograni, tada ima još priključak prema spremniku – za rasterećenje.



a) direktno upravljani dvograni tlačni regulacijski ventil

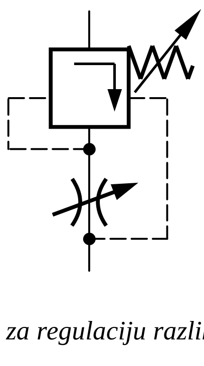


b) direktno upravljani trograni tlačni regulacijski ventil



c) indirektno upravljani trograni tlačni regulacijski ventil

Sl. 11.12 Primjeri redukcijskih ventila (shema i simbol)



Sl. 11.13 Dvograni ventil za regulaciju razlike tlaka (tlačna vaga)

11.4 Protočni ventili

Protočni ventili su ventili koji prigušivanjem utječu na protok u sustavu, a dijele se na:

– protočne upravljačke ventile i

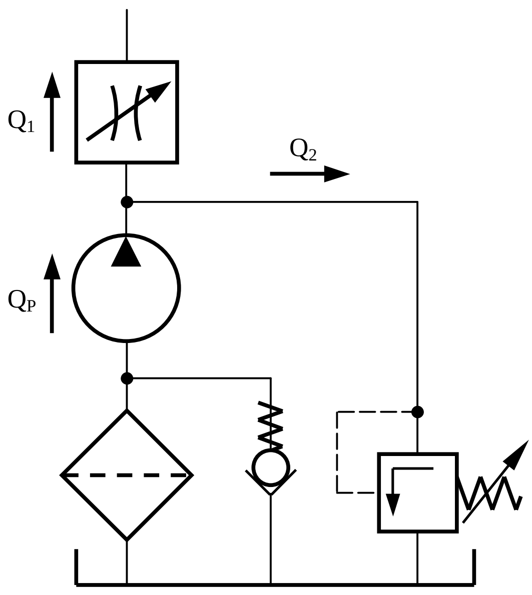
– regulatore protoka

Protočni upravljački ventili imaju zadatak da protok u sustavu prilagođavaju potrebama. Kao prigušni elementi koriste se *prigušnice* i *dijafragme* (blende). Općenito prigušnice imaju oblik uskih kanala, a dijafragme imaju oblik ploče sa uskim otvorom za protjecanje. Za razliku od prigušnica, hidraulički otpor dijafragmi u radnom području gotovo ne zavisi od viskoznosti fluida (a time niti od temperature). Zbog toga se dijafragme koriste npr. za mjerenje protoka. Regulatori protoka imaju zadatak da održavaju konstantni zadani protok u sustavu, nezavisno od opterećenja.

Za napajanje sustava često se koriste volumenske pumpe s približno konstantnim protokom Q_P. Regulacija protoka se u tom slučaju rješava dijeljenjem protoka (*Sl. 11.14*). Potrebni protok Q_1 regulira se pomoću regulacijske prigušnice. Volumenska pumpa ima izuzetno strmu ovisnost tlaka o protoku, tako da bi se sa smanjenjem protoka Q_1 ekstremno povećao tlak pumpe. To se sprječava ventilom za ograničenje tlaka – on održava praktički konstantan tlak pumpe, vraćajući suvišni dio protoka u spremnik. Time nastaje znatni gubitak energije – sva energija pumpe utrošena na stlačivanje količine (odn. protoka) Q_2 fluida gubi se prigušivanjem na ventilu za ograničenje tlaka; gubitak je proporcionalan protoku Q_2. Ovaj gubitak energije može se izbjeći tako da se za pogon pumpe koristi motor s promjenljivim brojem okretaja, odn. regulacijom protoka pumpe putem podešavanja broja okretaja.

Kriteriji kvalitete podesivih prigušnica su:

– mogućnost ostvarivanja odgovarajućeg hidrauličkog otpora
– nezavisnost otpora od viskoznosti radnog fluida
– mogućnost finog podešavanja otpora (zavisi od odnosa površine i opsega prigušnog elementa)



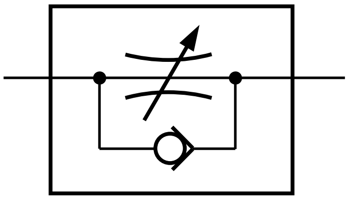
Sl. 11.14 Regulacija protoka pumpe

Tipovi podesivih prigušnica, koji u različitoj mjeri zadovoljavaju kriterije kvalitete:

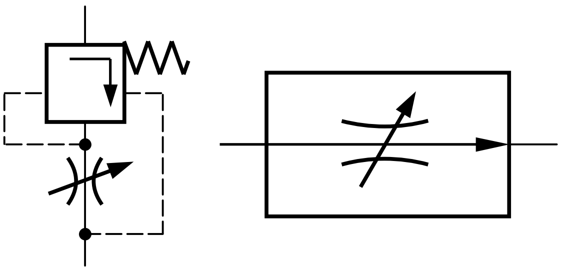
- prigušnica s iglom
- okretno-kružna prigušnica
- prigušnica s uzdužnim kanalom
- okretna prigušnica s kosim kanalom
- prigušnica s trokutastim utorom po obodu

Jednosmjerni prigušni ventil predstavlja kombinaciju podesive prigušnice i nepovratnog ventila. Ovaj ventil u jednom smjeru prigušuje tlak – upravlja veličinom protoka, zavisno od opterećenja. Podesivi ventili imaju mogućnost podešavanja ovog prigušenja. U suprotnom smjeru ventil se u potpunosti otvara – ima maksimalni mogući protočni presjek.

simbol:



Dvograni regulator protoka (*Sl. 11.15*) ima zadatak održavati konstantan protok namješten na podesivoj prigušnici. Razvodnik se normalno nalazi u međupoložaju između dva krajnja položaja, a izveden je tako da pritvaranjem postepeno prigušuje protok. Bez protoka tlak je na oba čela klipa razvodnika isti, tako da opruga dovodi razvodnik u potpuno otvoreni položaj. Pri željenom (namještenom) protoku, na prigušnici je uvijek isti pad tlaka. Povećanje tog pada tlaka izaziva pritvaranje razvodnika (*tlačna vaga*) čime se smanjuje protok, i obrnuto.



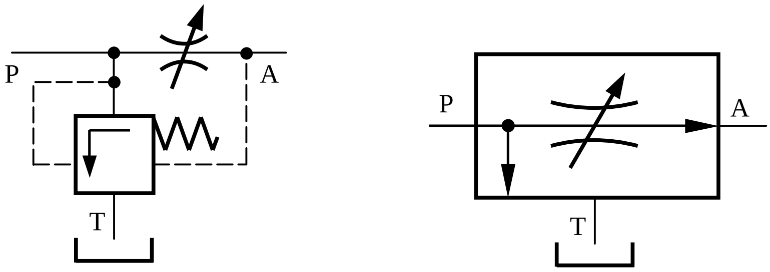
Sl. 11.15 Dvograni regulator protoka (tlačna vaga)

Trograni regulator protoka (*Sl. 11.16*) ima ventil za regulaciju razlike tlaka koji je priključen paralelno na mjernu prigušnicu, tako da se višak radnog fluida odvaja (npr. prelijeva u spremnik).

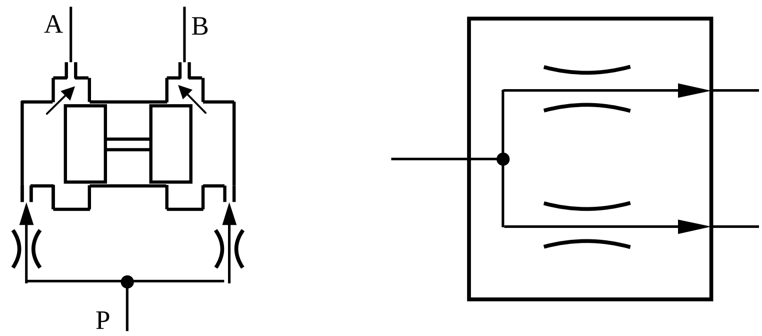
Ventil za raspodjelu protoka (*Sl. 11.17*) ima zadatak protok podijeliti tako da oba izlazna protoka (A i B) budu jednaka. Dvije identične mjerne prigušnice (blende) konstantnog otpora izazivaju jednake padove tlaka kad su protoci kroz obje prigušnice isti. Izlazni tlak svake prigušnice djeluje na čelo odgovarajućeg klipa prema slici. Dvostruki klip (tlačna vaga) osigurava da tlak na izlazu obje prigušnice bude jednak.

Daljnje prigušenje ostvaruje se protokom kroz zazor između cilindra i klipa. Zauzimanjem ravnotežnog položaja ovaj dvostruki klip kompenzira eventualnu

razliku tlaka na priključcima A i B. Ako se pretpostavi da se klip nalazi u srednjem položaju, a da je npr. tlak na priključku A veći od tlaka na priključku B ($p_A > p_B$), bit će veći i protok kroz B-granu. To će izazvati povećani pad tlaka na mjernoj prigušnici B-grane pa će i tlak na desnom klipu biti manji. Klip se zato pomiče udesno u ravnotežni položaj, gdje u manjoj mjeri prigušuje protok A, a u većoj mjeri protok B ($\Delta p_B > \Delta p_A$). Tlak u obje komore sada je isti $p_A + \Delta p_A = p_B + \Delta p_B$. Time je kompenzirana razlika tlaka na izlaznim priključcima i postignut traženi cilj – ostvarena je jednakomjerna podjela protoka.



Sl. 11.16 Trograni regulator protoka



Sl. 11.17 Ventil za raspodjelu protoka, princip rada i simbol

12 AKUMULATORI

Hidraulički akumulatori su posude koje iz hidrauličkog sustava preuzimaju izvjestan volumen radnog fluida pod tlakom, pa prema potrebi taj fluid vraćaju u sustav. Svrha i zadaci hidrauličkih akumulatora su sljedeći

– **Pohranjivanje rezerve fluida pod tlakom**. Time se omogućava odabir kapaciteta pumpe prema prosječnim potrebama sustava, a vršna opterećenja (razlika između trenutno potrebnog protoka i maksimalnog protoka pumpe) pokrivaju se rezervom iz akumulatora.

– **Napajanje sustava za slučaj nužde**. U slučaju kvara pumpe akumulator preuzima napajanje sustava kako bi se mogao završiti već započeti radni ciklus.

– **Kompenzacija curenja**. Nadoknađivanje gubitaka curenja fluida iz hidrauličkog sustava.

– **Izjednačavanje volumena**. Djeluje kao ekspanzijska posuda – preuzima višak volumena fluida koji nastaje zbog zagrijavanja fluida (toplinske dilatacija), čime se izbjegavaju oštećenja zatvorenog sustava.

– **Smanjivanje vršnih tlakova** – prilikom trenutačnog uključivanja uređaja.

– **Prigušivanje pulsacija** – smanjivanje nejednolikosti protoka i tlaka volumenske pumpe.

– **Iskorištavanje energije kočenja** – akumulator prilikom punjenja preuzima energiju tereta koji se koči.

– **Uloga opruge/amortizera** – akumulator može održavati tlak u sustavu i preuzimati udare (aktivni ovjes, održavanje nategnutosti užadi).

– **Za kočenje u nuždi**.

Tlak fluida u akumulatoru može se održavati pomoću klipa s *utegom* ili *oprugom*, a u praksi najčešće se koriste akumulatori s plinom (dušikom) pod tlakom. Zato se uglavnom koristi plin dušik, a zrak nije dozvoljen zbog opasnosti od eksplozije. Plin i radni fluid redovito su odvojeni stjenkom, a prema tipu stjenke razlikuju se:

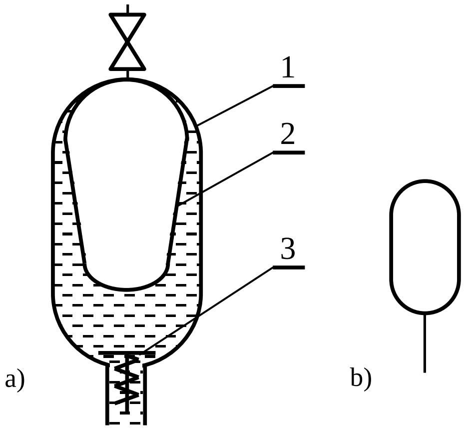
– akumulatori s klipom,
– akumulatori s membranom i
– akumulatori s mijehom.

Akumulatori s klipom. Plin i radni fluid smješteni su u cilindru i razdvojeni slobodno pokretnim (letećim) klipom. Koriste se za relativno velike volumene i protoke. Tlak pretpunjenja (plin zauzima maksimalni mogući volumen V_0) označit će se s p_0, a minimalni i maksimalni dopušteni radni tlak p_1 i p_2 respektivno (odgovarajući volumeni plina su V_1 i V_2). Za akumulatore s klipom maksimalni omjer tlakova $p_0{:}p_2 = 1{:}10$. Tlak pretpunjenja plina p_0 treba biti 5 bar niži od minimalnog radnog tlaka fluida p_1.

Akumulatori s membranom imaju oblik kugle koja je na sredini horizontalno podijeljena elastičnom membranom koja dijeli volumen ulja i plina. Koriste se za manje volumene, često za kompenzaciju vršnog tlaka ili za smanjivanje nejednolikosti protoka i tlaka. Maksimalni odnos tlakova ponovo iznosi 1:10.

Akumulatori s mijehom (*Sl. 2.1 a*) sastoje se od čelične posude ispunjene uljem u kojoj se nalazi elastični mijeh prethodno napunjen plinom. Plin se puni kroz gornji ventil, a na (donjem) priključku za ulje smješten je tanjurasti ventil koji sprječavaju izlaz mijeha i štiti ga od oštećenja. Ako je tlak ulja veći od tlaka plina, ulje kroz

tanjurasti ventil ulazi u akumulator, smanjuje se volumen mijeha, a plin se komprimira. Ovaj tip akumulatora odlikuje se apsolutnim brtvljenjem plin-ulje, i brzim reagiranjem (zanemariva inercija). Maksimalni odnos tlakova iznosi 1:4. Apsolutni tlak pretpunjenja plina p_0 mora iznositi 70-90% minimalnog radnog tlaka fluida p_1, čime se sprječava stalni dodir mijeha i tanjurastog ventila i moguća oštećenja.



Sl. 12.1 a)shema akumulatora s mijehom: 1 – posuda, 2 – mijeh, 3 – tanjurasti ventil, b) simbol akumulatora

Promjena stanja plina je politropska

$$pV^{n} = const. \tag{12.1}$$

pri čemu su

n	eksponent politrope (izoterma: n=1, izentropa: n=κ),
κ	eksponent izentrope,
p	apsolutni tlak plina,
ρ	gustoća plina

U slučaju vrlo polaganog procesa promjene stanja plina, temperatura plina ostaje konstantna (izotermna promjena stanja, n=1), dok kod vrlo brzog procesa nema izmjene topline plina s okolinom (adijabatska promjena stanja, n=κ, eksponent izentrope za zrak i dušik iznosi κ=1,4). U praksi, procesi promjene stanja plina kraći od cca 1 min odvijaju se otprilike adijabatski, a procesi dulji od cca 3 min odvijaju se otprilike izentropski, dok ostali procesi leže između ovih graničnih procesa (politropski proces uz 1<n<1,4, n≈1,2 [14]).

Ako minimalnom p_1 i maksimalnom p_2 radnom tlaku odgovaraju volumeni V_1 i V_2 stlačenog plina u akumulatoru, raspoloživi korisni volumen akumulatora ΔV iznosi

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_1 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \tag{12.2}$$

Primjer

Odredite potrebni volumen V_0 akumulatora punjenog dušikom κ=1,4, ako uz radne tlakove p_1 = 100 bar i p_2 = 150 bar, korisni volumen akumulatora treba iznositi ΔV = 4 *l*.

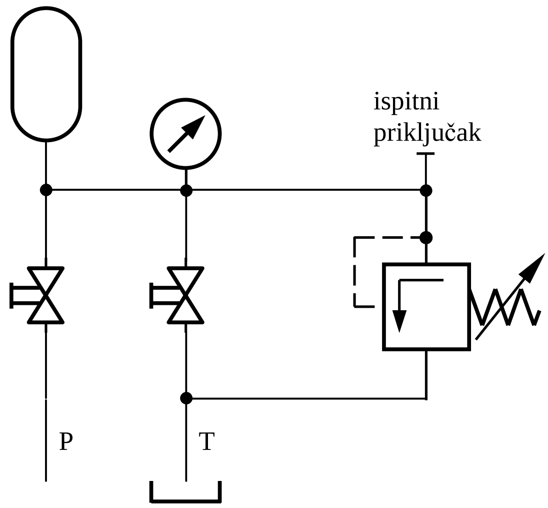
Rješenje: Odabire se adijabatska (brza) promjena stanja plina (n=κ), dok se kao tlak pretpunjenja odabire 70 % minimalnog radnog tlaka (p_0 = 0,7,·p_1 = 70 bar).

$$V_0 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = \Delta V \frac{\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{\kappa}}}{1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}}} = 20,5 \quad l \tag{12.3}$$

Uz opisanu analizu mogućih stacionarnih stanja akumulatora, najčešće je potrebno provesti i analizu dinamičkog ponašanja akumulatora, radi ispravnog funkcioniranja sustava i odabira akumulatora.

Akumulatori podliježu propisima za posude pod tlakom, koji između ostalog propisuju:

1. akumulator mora imati odgovarajući manometar
2. akumulator mora imati sigurnosni ventil koji se ne može isključiti niti neovlašteno podešavati
3. u dovodni vod mora se ugraditi ručni zaporni ventil
4. akumulator se mora ispitati (način ispitivanja zavisi od maksimalnog radnog tlaka).



Sl. 12.2 Mogući priključak akumulatora, sukladno propisima za posude pod tlakom

13 FILTRI

Zadatak filtra je da razinu prljavštine ulja smanji na dozvoljenu vrijednost. Time se hidraulički elementi štite od prekomjernog habanja i povećava se pouzdanost rada hidrauličkog sustava.

Finoća filtriranja (apsolutna finoća filtriranja) odgovara promjeru najveće čestice u obliku kugle koja može proći kroz filtar. Hidraulički elementi imaju sve manje zračnosti između kliznih ploha, danas se zahtijeva finoća filtriranja od 20 μm, a za servo-ventile i do 3 μm. Nečistoće se dijele na unutarnje i vanjske, unutarnje nastaju trošenjem i otkidanjem čestica hidrauličkih elemenata, a vanjske su posljedica lošeg brtvljenja sustava prema okolini (filtar za zrak na spremniku, brtve na cilindrima itd.)

Posljedice krutih nečistoća u hidrauličkoj tekućini su:

a) povećano istjecanje tekućine zbog lošijeg brtvljenja,
b) blokiranje rada kliznih elemenata,
c) promjena karakteristike regulacijskih ventila,
d) smanjenje vijeka trajanja hidrauličkih elemenata i sustava.

Dozvoljene vrijednosti količine prljavštine uzimaju u obzir:

a) vrste čestica prljavštine
b) veličine čestica prljavštine
c) broj čestica prljavštine
d) brzinu strujanja radnog medija u hidrauličkim elementima
e) radni tlak
f) tolerancije i konstruktivne osobine elemenata.

Klasa čistoće hidrauličkog ulja definira dopušteni broj čestica određene veličine u uzorku ulja određenog volumena. Npr. norma ISO 4406, klasu označava s dva broja, prvi se odnosi na dopušteni br. čestica do 5 μm, a drugi na dopušteni br. čestica do 15 μm. Norma NAS 1638 definira 14 klasa čistoće. Čestice nečistoće dijeli u 5 razreda veličine, pa sukladno svaka klasa ima 5 dopuštenih brojeva čestica različitih veličina.

Karakteristike filtra su:

a) finoća filtriranja,
b) količina izdvojenih čestica,
c) protok radnog fluida kroz filtar,
d) pad tlaka na filtru.

Značajan podatak je *stupanj* (faktor) *finoće filtriranja* β_x koji predstavlja omjer broja čestica n_x veličine x prije i poslije filtriranja. Npr. $\beta_{15} = 75$ znači da je na ulazu u filtar bilo 75 puta više čestica veličine x = 15 μm nego na izlazu iz njega. Neki puta se uspješnost izdvajanja čestica izražava postotnim omjerom broja izdvojenih i ukupnog broja čestica koji se naziva *stupanj izdvajanja* i iznosi:

$$\text{Stupanj izdvajanja} = (1 - 1/\beta_x)\text{x}100\% \qquad (13.1)$$

Uz stupanj finoće filtriranja koriste se i termini *nominalna finoća filtriranja* za stupanj finoće $\beta_x = 20$ (95%) i *apsolutna finoća filtriranja* za stupanj finoće $\beta_x = 100$ (99%).

Materijal filtar-elementa (uloška) je zvjezdasto nabran, čime se dobiva vrlo velika površina filtriranja uz relativno mali volumen filtar-elementa. Također, time se povećava vijek trajanja odn. usporava prljanje filtra, jer se nečistoća nakuplja u naborima, dok 'brjegovi' nabora ostaju relativno čisti. Postoje površinski (tkanina) i dubinski (vuna) filtri. Površinski omogućavaju izdvajanje čestica većih od 10 μm i

mogu se regenerirati ispiranjem. Dubinski se koriste za izdvajanje čestica manjih od 20 μm i ne mogu se ispirati (za jednokratnu upotrebu).

Uobičajeni materijali od kojih se izrađuju filtarski elementi su:

a) žičana tkanina
b) papir
c) metal-fiber (metalna vuna)

Žičana tkanina je tkanina od nehrđajućeg čelika. *Papirni filtar* izrađen je od papirnog runa koje omogućuje finoću filtriranja od 10 μm. Ne može se prati – koristi se jednokratno i baca. *Metal-fiber* je runo od metalnih vlakana. Odlikuje ga dubinsko filtriranje (izrazito veliki kapacitet zadržavanja nečistoće u odnosu na volumen filtra i odgovarajuća dugotrajnost), otpornost na temperaturu, visok dozvoljeni pad tlaka i visoka čvrstoća. Danas se često koriste i filtri s višestrukom konstrukcijom pletiva – 'Betamicron'.

Zaprljanost filtra određuje se posredno pomoću mjerenja (osjetnik) pada tlaka na filtru. Pokazivač zaprljanosti može biti električni i/ili optički (lampica). Pad tlaka na čistom filtru iznosi oko 0,1 bar, dok je na zaprljanom višestruko veći.

Prema mjestu ugradnje filtri se dijele na:

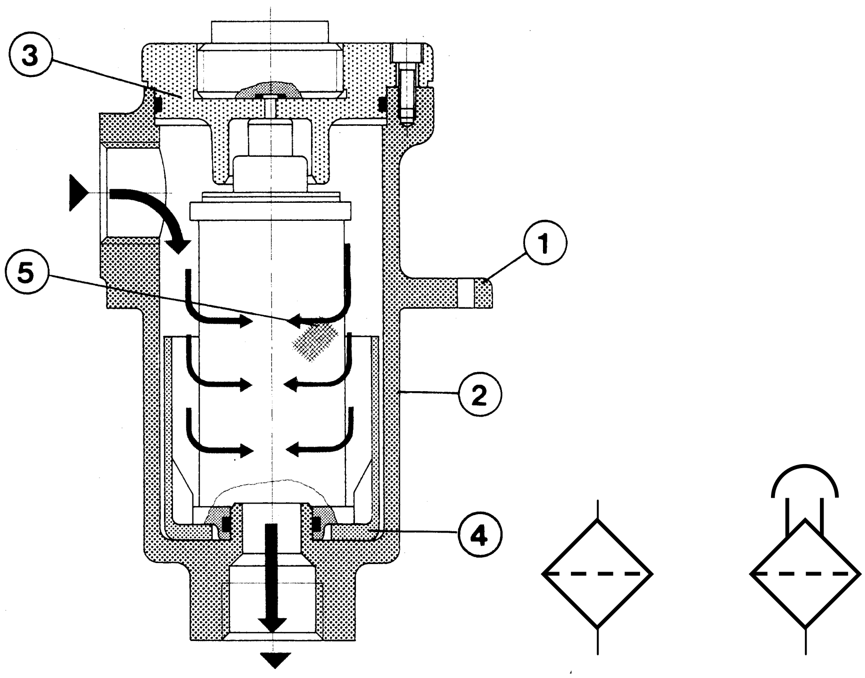
a) usisni filtar
b) tlačni filtar
c) povratni filtar

Usisni filtar ugrađuje se u usisni vod pumpe. Radni fluid usisava se iz spremnika kroz filtarski element, pa u sustav ulazi samo filtrirano ulje. Finoća filtriranja uobičajeno iznosi oko 100 μm. Nedostaci ovog tipa filtra su loša pristupačnost (otežano održavanje) i otpor na ulazu u pumpu (mogućnost kavitacije). Oko filtra se za slučaj zaprljanog filtra ili za hladno vrijeme često postavlja obilazni vod (bypass) s uključnim (bypass) ventilom koji se otvara pri 0,2 bar.

Tlačni filtar ugrađuje se u tlačni vod, npr. iza pumpe ili ispred servo-ventila. Najčešće se ugrađuje neposredno ispred upravljačkih ili regulacijskih uređaja, za njihovu zaštitu. Konstrukcija filtra mora biti robusna jer je izložen maksimalnom tlaku (radni pritisak filtra do 420 bar). Uobičajene su finoće filtriranja 1-10 μm.

Povratni filtar (*Sl. 1.1*) ugrađuje se u povratni vod (ispred spremnika) i najčešće se koristi u hidrauličkim sustavima. Uobičajena finoća filtriranja iznosi 10-20 μm, a radni tlak do 30 bar. Ovi filtri su lako pristupačni i laki su za održavanje. Filtarski element smješta se u lonac koji se vadi zajedno s elementom, čime se sprječava prodor sakupljene nečistoće u spremnik. Da se izbjegne isključivanje sustava prilikom izmjene filtarskog elementa, koriste se dvojni filtri (dva paralelno priključena filtra, svaki opremljen zapornim ventilima na ulazu i izlazu).

Nalivni filtar / filtar za odzračivanje ugrađuje se u spremnik ulja i ima dvojaku funkciju. Preko njega se nalijeva ulje u spremnik (služi kao nalivni filtar), čime se sprječava prodor prljavštine u spremnik i dalje u sustav. Odzračni otvor spojen je preko ovog filtra (služi kao filtar za odzračivanje). Odzračni otvor osigurava atmosferski tlak u spremniku, bez obzira na promjene nivoa odn. volumena ulja u spremniku. Pri tome filtar pročišćava zrak koji ulazi u spremnik.



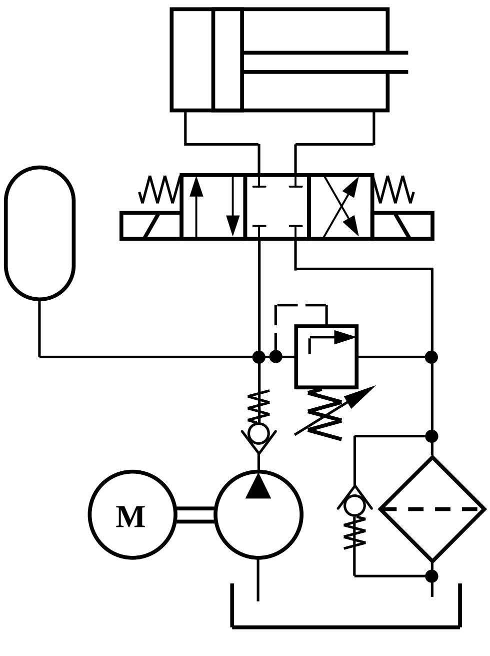
Sl. 13.1 Povratni filtar – shema, simboli za filtar i nalivni filtar [15]*: 1 – nosač, 2 – lonac, 3 – poklopac, 4 – čašica, 5 – filtarski element*

14 PRIMJERI FUNKCIJSKIH SHEMA

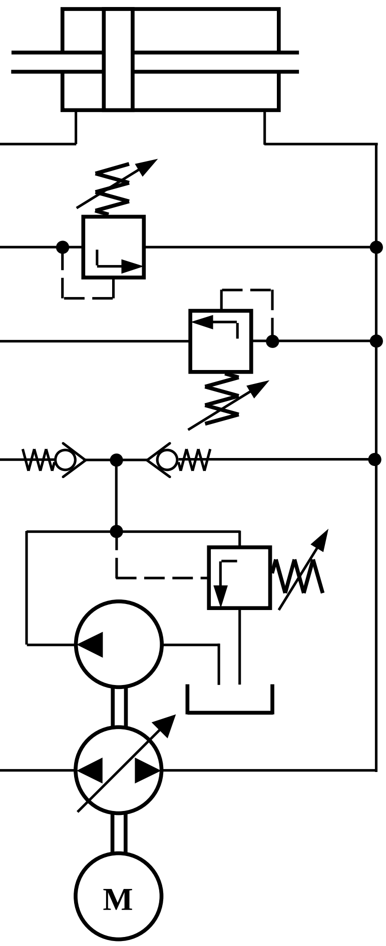
14.1 Hidraulički pogoni

Upravljanje hidrauličkom energijom može biti *prigušno* i *volumensko*. Upravljanje prigušivanjem je jednostavno, ali skopčano sa znatnim energetskim gubicima. Pri volumenskom upravljanju protok pumpe se podešava (promjenom radnog volumena ili broja okretaja) potrebama izvršnog hidrauličkog motora.

Hidraulički pogon s otvorenim optokom (*Sl. 1.1*). Hidraulički fluid protječe uvijek u istom smjeru, od spremnika preko pumpe i motora nazad u spremnik. Ventil za ograničenje tlaka štiti instalaciju od prekomjernog tlaka i ujedno odvodi prekomjerni fluid u spremnik uz prigušivanje (gubitak energije). Ugradnjom hidrauličkog akumulatora gubici se donekle smanjuju, jer se prekomjerni fluid i energija pumpe prikupljaju u akumulatoru u vrijeme dok je razvodnik u zatvorenom (srednjem) položaju. Ako se ti gubici žele izbjeći, koristi se pumpa promjenljivog kapaciteta (volumensko upravljanje). Akumulator štiti sustav od tlačnih udara i pokriva vršna opterećenja. Unutar hidrauličkog kruga potrebno je ugraditi i filtar za ulje.



Sl. 14.1 Hidraulički pogon s otvorenim optokom

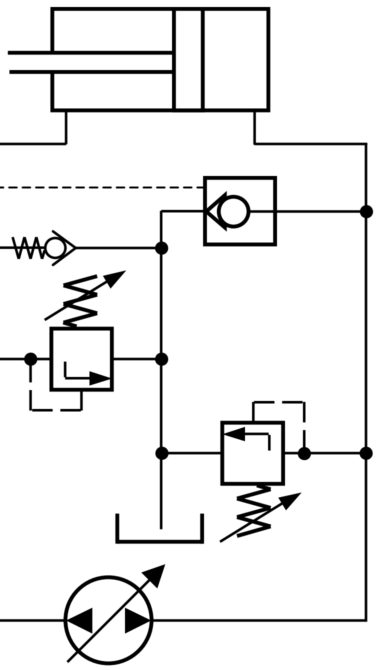


Sl. 14.2 Hidraulički pogon sa zatvorenim optokom

Hidraulički pogon sa zatvorenim optokom (*Sl. 14.2*). Hidraulički fluid optječe kroz zatvoreni krug od pumpe do hidrauličkog motora i natrag. Fluid za rad hidrauličkog motora dobavlja pumpa promjenljivog kapaciteta, a njen protok se prilagođava potrebama tog motora. Potreban je i pomoćni hidraulički sustav za nadopunjavanje

volumenskih gubitaka. Nadopunjavanje se uvijek vrši u povratni vod (niži tlak). Pomoćni sustav se sastoji od pumpe za nadopunjavanje (mali kapacitet), ventila za ograničenje tlaka, dva nepovratna ventila i filtra (nije prikazan na slici). U zatvorenom sustavu motor mora imati jednaku potrošnju ulja pri radu u oba smjera (npr. cilindar s prolaznom klipnjačom). Oba voda štite se od prekomjernog tlaka pomoću ventila za ograničenje tlaka s izlazom spojenim na povratni vod. Ako se na mjestu pumpe i potrošača koriste reverzibilni (pumpa-motor) strojevi, moguća je zamjena funkcije hidrauličkog motora i pumpe. To omogućuje ostvarivanje funkcije kočenja. Budući da je u zatvorenom optoku motor uvijek hidraulički 'upet', moguć je pogon i kočenje u oba smjera (četverokvadrantni pogon).

Ako se kao hidraulički motor koristi diferencijalni cilindar koji nema jednaki protok u tlačnom i povratnom vodu, umjesto zatvorenog koristi se **hidraulički pogon s poluotvorenim (tj. poluzatvorenim) optokom** (*Sl. 14.3*). Pri izvlačenju klipnjače (ulijevo), zbog nedovoljnog protoka opada tlak u povratnom vodu (opasnost od kavitacije u pumpi). Manjak fluida nadoknađuje se tada kroz nepovratni ventil. Pri uvlačenju klipnjače (udesno) otvara se pod utjecajem tlaka nepovratni ventil s hidrauličkim deblokiranjem, pa se njime višak fluida odvodi u spremnik.



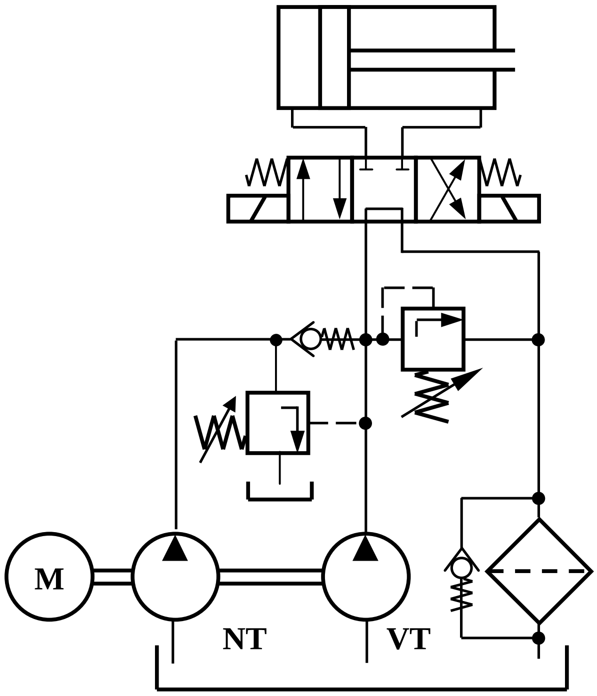
Sl. 14.3 Hidraulički pogon s poluotvorenim optokom

14.2 Upravljanje brzine izvršnog motora

14.2.1 Paralelni spoj pumpi

Pogonska jedinica koja se sastoji od više pumpi različitog kapaciteta u paralelnom spoju omogućava variranje brzine izvršnog motora, tako da se pojedine pumpe isključuju odn. uključuju (varira se ukupni protok). Pumpe mogu biti gonjene istim elektromotorom, pri čemu se sukladno potrebnom protoku neke od njih razvodnim prekidačima spajaju na ulaze izvršnih hidromotora (opterećuju se), a neke su rasterećene spajanjem na spremnik (prazni hod pumpe). Npr. kombinacijama 2 različite pumpe moguće je ostvariti 3 različita ukupna protoka, pomoću 3 pumpe 7 protoka itd.

Daljnju mogućnost predstavlja korištenje visokotlačne i niskotlačne pumpe u paralelnom spoju (*Sl. 14.4*). Dok je izvršni hidromotor opterećen manjim silama, opskrbljuju ga obje pumpe (povećani protok i brzina hidromotora). Za svladavanje povećanog opterećenja hidromotora potreban je i povećani tlak. Niskotlačnu pumpu tada se može automatski rasteretiti i spojiti sa spremnikom pomoću ventila za ograničenje tlaka, tako da samo visokotlačna pumpa opskrbljuje hidromotor, što uz smanjeni ukupni protok daje i manju brzinu izvršnog motora pri povećanom opterećenju. Također vrijedi uočiti da su u neutralnom položaju razvodnika pumpe rasterećene (tlačni vod je kratko spojen na spremnik).



Sl. 14.4 Spoj za ubrzanje kretanja s pumpom niskog tlaka

14.2.2 Upravljanje brzinom diferencijalnog cilindra

Spoj cilindra prikazan *Sl. 14.5* na osigurava jednaku brzinu kretanja klipa diferencijalnog cilindra u oba smjera pod uvjetom da odnos korisnih površina klipa iznosi $S_1{:}S_2 = 2{:}1$. Površina S_2 neprestano je pod tlakom napajanja. Za vrijeme kretanja unazad (ulijevo) brzina klipnjače iznosi

$$v = Q/S_2. \qquad (14.1)$$

Za vrijeme kretanja unaprijed (udesno) protok iznosi

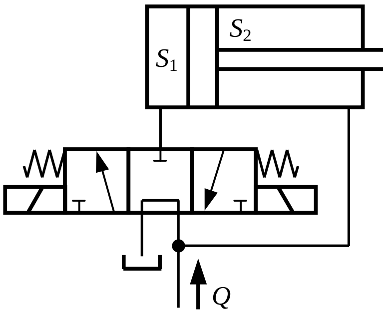
$$Q_1 = vS_1 = Q + Q_2 = Q + vS_2,$$

pa slijedi

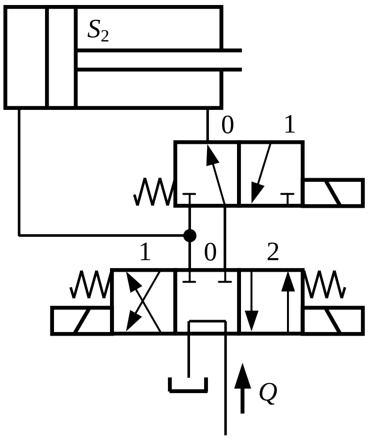
$$v = Q/(S_1\text{-}S_2) = Q/S_2. \qquad (14.2)$$

Spoj prikazan na *Sl. 14.6* naziva se spoj s ubrzanim kretanjem diferencijalnog cilindra. Kretanje prema nazad i brzo kretanje prema naprijed imaju jednake brzine (kao u prethodnom slučaju). Normalno kretanje prema naprijed (razvodni položaji V1:0 i V2:1) je dvostruko sporije

$v = Q/S_1 = 0{,}5 \cdot Q/S_2.$ (14.3)



Sl. 14.5 Diferencijalni cilindar s jednakom brzinom kretanja



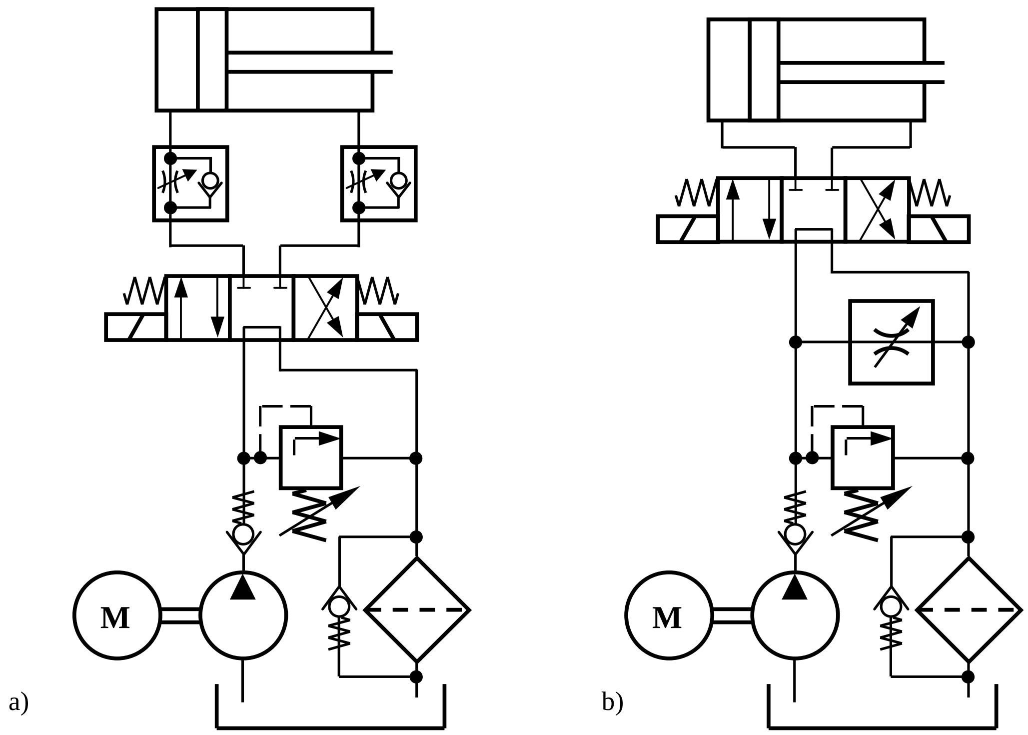
V1	V2	Cilindar
0	0	stop
	1	naprijed
	2	nazad
1	0	stop
	1	brzo naprijed
	2	stop

Sl. 14.6 Diferencijalni cilindar s ubrzanim kretanjem

14.2.3 Upravljanje pomoću prigušnih ventila

Sl. 14.7 a) prikazuje usporavanje gibanja klipnjače hidrauličkog cilindra pomoću prigušnih ventila spojenih u *seriju* s cilindrom. Treba naglasiti da se pri serijskom spajanju protočnih ventila (prigušnih ili regulatora protoka) s cilindrom, i uz korištenje pumpe konstantnog kapaciteta, brzina klipnjače (tj. protok) smanjuje jedino tako da se višak protoka odvede u spremnik (u ovom slučaju kroz ventil za ograničenje tlaka). Potpunim otvaranjem prigušnog ventila dobiva se najveća brzina klipnjače, a pritvaranjem se ta brzina smanjuje. Prigušno-nepovratni (jednosmjerni) ventili prigušuju fluid na izlasku iz cilindra (u povratnom vodu), pa sustav radi s protutlakom, što je najčešće povoljnije, npr. kod rada s držanjem tereta. Razlika tlaka (prigušivanje) na prigušnom ventilu povećava se otprilike proporcionalno kvadratu protoka odn. brzine klipnjače. Smanjenjem opterećenja smanjuje se razlika tlaka u cilindru i povećava protok kroz cilindar, a time se povećava i pad tlaka na prigušnici. Neutralizirajući na taj način dio smanjenog pada tlaka na cilindru, prigušnica u izvjesnoj mjeri smanjuje protok (i brzinu cilindra).

Sl. 14.7 b) prikazuje usporavanje gibanja klipnjače hidrauličkog cilindra pomoću prigušnog ventila spojenog *paralelno* s cilindrom. Uz potpuno otvoreni prigušni ventil klipnjača ima najmanju brzinu, a maksimalna brzina dobiva se potpunim zatvaranjem ventila.



Sl. 14.7 Usporavanje klipnjače pomoću prigušnih ventila a) u serijskom spoju b) u paralelnom spoju

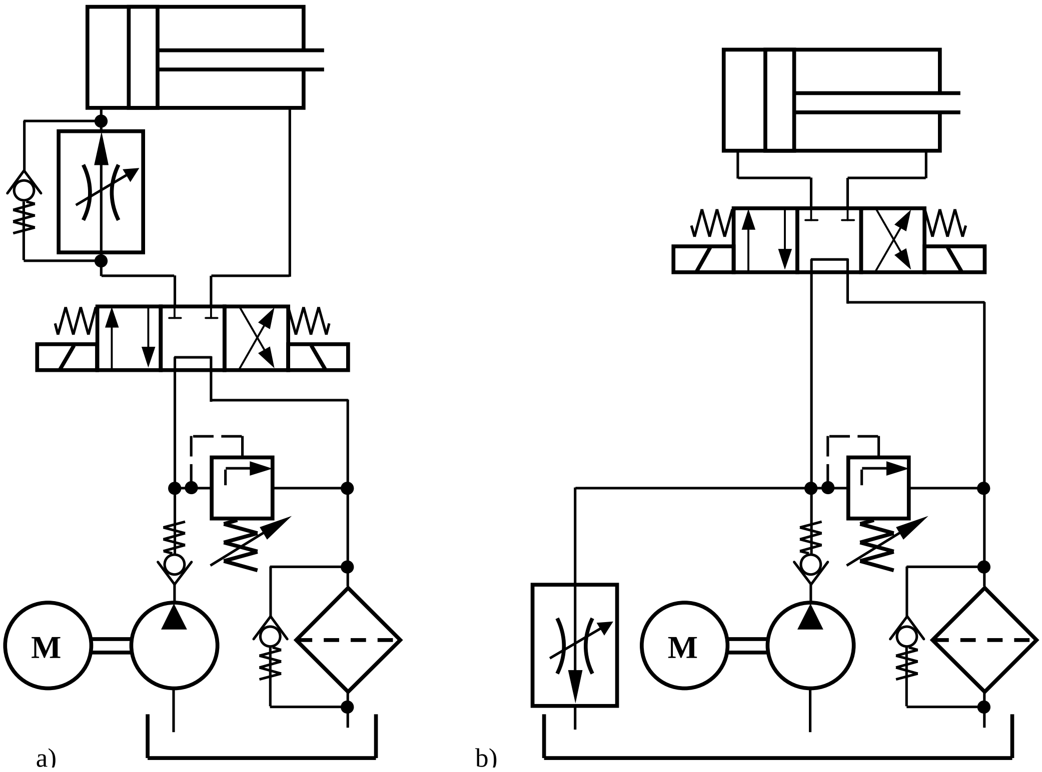
Na prigušnim ventilima pretvara se energija pumpe u toplinu. Dakle, gubi se energija uz istovremeno štetno zagrijavanje radnog fluida. Namještena površina prigušnog otvora je konstantna, pa se promjenom tlaka u sustavu mijenja brzina klipnjače, što ograničava primjenu upravljanja pomoću prigušnih ventila. Kontinuirano upravljanje prigušenjem i/ili regulacija brzine kretanja klipa može se ostvariti proporcionalnim ili servo-ventilima.

14.2.4 Upravljanje pomoću regulatora protoka

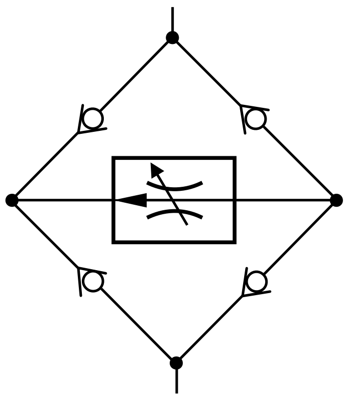
Nužan uvjet za konstantnu brzinu kretanja klipa je konstantan protok. On se može osigurati ugradnjom regulatora protoka. U principu time se poništava djelovanje promjene opterećenja na brzinu klipnjače. Regulator protoka može se priključiti u seriju ili paralelno (u obilazni vod – 'bypass') s cilindrom. Regulator protoka može u oba slučaja biti dvograni ili trograni. Da se smanji regulacijsko odstupanje, sustav regulator – cilindar treba imati što veću mehaničku krutost (krute cijevi, što manji volumen radnog fluida odn. regulator postavljen u blizini cilindra). Prilikom pokretanja (uključivanja) regulator je u principu otvoren (nema razlike tlaka na tlačnoj vagi), što dovodi do skokovitog pokretanja.

Sl. 14.8 a) prikazuje regulator protoka serijski ugrađen u tlačni vod. Klip nije hidraulički ukliješten, što dovodi do skokovitog kretanja u slučaju bez opterećenja. Ovaj spoj se primjenjuje kad opterećenje djeluje samo u jednom smjeru. Ugradnjom regulatora u povratni vod postiže se hidrauličko ukliještenje, pa tada gotovo izostaju promjene brzine zbog promjene opterećenja. Graetzov spoj regulatora (*Sl. 14.9*) osigurava djelovanje regulatora u oba smjera kretanja. U slučaju motora koji ima isti radni volumen u oba smjera (npr. cilindar s prolaznom klipnjačom) ovaj spoj osigurava istu brzinu kretanja u oba smjera.

Sl. 14.8 b) prikazuje paralelni spoj regulatora i cilindra. Takva regulacija protoka nije pretjerano točna, ali djeluje jednako pri kretanju klipnjače u oba smjera.



Sl. 14.8 Regulator protoka u a) serijskom b) paralelnom spoju s cilindrom



Sl. 14.9 Regulator u Graetzovom spoju

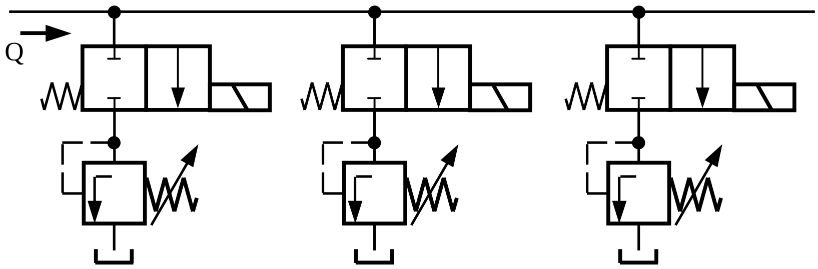
Zadaci upravljanja tlaka mogu biti:

- zaštita hidrauličkog sustava od preopterećenja (sigurnosni ventil)
- ograničenje tlaka na više razina
- snižavanje tlaka
- hidrauličko protu-držanje.

Za *zaštitu* od preopterećenja ventil za ograničenje tlaka (sigurnosni) ugrađuje se paralelno – tlačni priključak ventila spaja se na tlačni vod a izlazni se kratko spaja na spremnik. Za zaštitu pumpe (obavezno) ugrađuje se neposredno iza pumpe, a za zaštitu nekog (izvršnog) elementa, spaja se neposredno ispred tog elementa (takvim spojem može se rješavati i slučaj kada je potrebno smanjenje tlaka za izvršni element – npr. spoj na jedan od vodova cilindra u cilju smanjenja tlaka pri hodu u jednom smjeru). Za zaštitu izvršnih elemenata od udara tlaka koristi se hidraulički akumulator

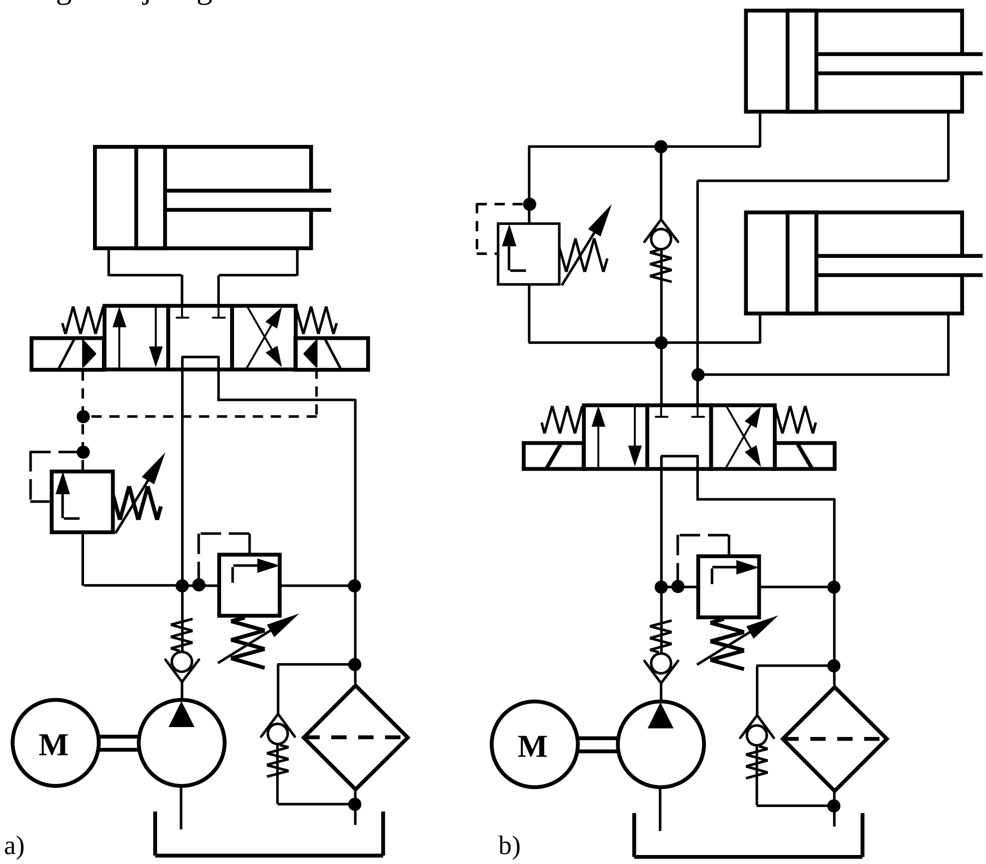
koji se spaja paralelno s elementom. Pumpa se od povratnog udara tlaka redovito štiti nepovratnim ventilom koji se ugrađuje serijski iza pumpe.

Za *ograničenje tlaka na više razina* moguće je na tlačni vod paralelno spojiti više različitih ventila za ograničenje tlaka (*Sl. 14.10*).Tada se ispred ventila (serijski) postavlja razvodni prekidač kojim se dati ventil daljinski uključuje ili isključuje. Tlak se održava na razini koju dopušta najslabiji od uključenih ventila za ograničenje tlaka.



Sl. 14.10 Ograničenje tlaka na više razina

Sl. 14.11 a) prikazuje cilindar upravljan dvostupanjskim 4/2 razvodnikom. Pomoću ventila za *sniženje tlaka* reducira se tlak fluida kojim se aktivira glavni razvodnik, tj. upravljački (pilot) razvodnik razvodi fluid nižeg tlaka. *Sl. 14.11* b) pokazuje kako se može smanjiti tlak pri kretanju klipnjače (gornji cilindar) samo u jednom smjeru (prema naprijed odn. udesno). Pri kretanju unazad oba cilindra napajaju se pod punim tlakom. Naravno, ako se želi reducirati tlak napajanja jednog cilindra (u oba smjera), treba svaki cilindar upravljati putem zasebnog razvodnika, a redukciju tlaka izvršiti ispred odgovarajućeg razvodnika.

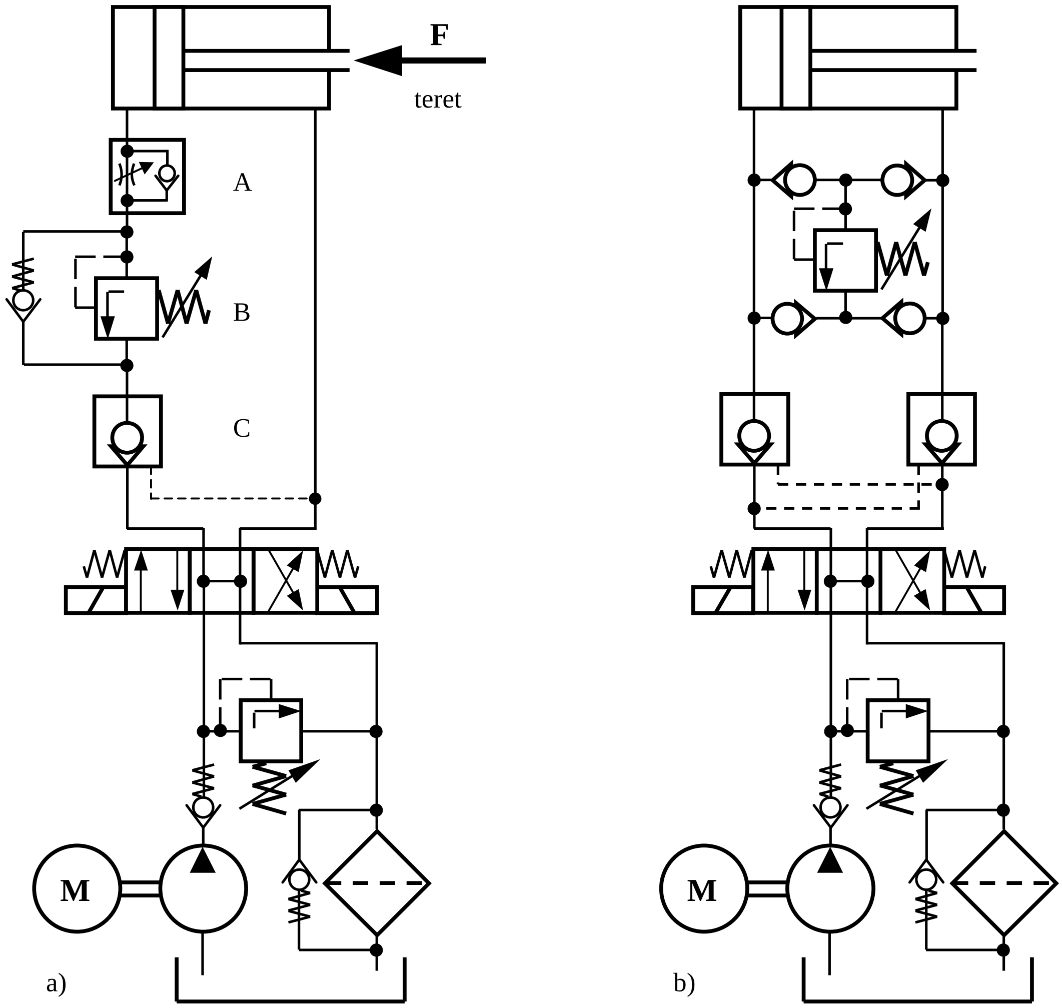


Sl. 14.11 Snižavanje tlaka a) predupravljanog razvodnika b) cilindra

14.3 Blokiranje cilindra

Blokiranje klipnjače u željenom položaju ostvaruje se tako da se onemogući istjecanje hidrauličkog fluida. Može se ostvariti razvodnikom sa sjedištima i zatvorenim priključcima cilindra u neutralnom položaju (npr. *Sl. 1.1*).

Sl. 14.12 a) prikazuje držanje u zadanom položaju tereta koji djeluje silom uvijek u istom smjeru i svojim pritiskom uzrokuje povećanje tlaka zarobljenog fluida. Istjecanje fluida pod tlakom tu se onemogućava ugradnjom 'blokirajućeg' nepovratnog ventila s tlačnim deblokiranjem (C) u povratni vod.



Sl. 14.12 Blokiranje cilindra a) u jednom smjeru b) u oba smjera

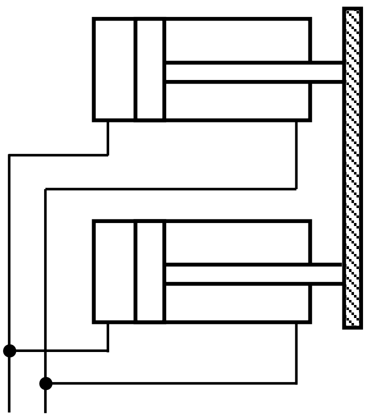
U seriju s tim ventilom potrebno je uključiti i 'potporni' tlačni uključni ventil (B) koji se otvara pri tlaku koji je bar 10% veći nego što je potrebno za držanje tereta. To se naziva hidrauličko podupiranje ili protu-držanje. Tek kad na suprotnu stranu klipa djeluje radni tlak, svladava se ovo 'pred-naprezanje' i omogućava uvlačenje klipnjače. U seriju se može ugraditi još i prigušni ventil (A) kojim se usporava kretanje (često spuštanje) tereta. U neutralnom položaju razvodnik mora imati kratko spojene izlazne kanale, kako bi se u tom položaju onemogućila deblokada 'blokirajućeg' ventila.

Sl. 14.12 b) prikazuje izvedbu blokade kretanja klipnjače u oba smjera ugradnjom blokirajućeg ventila u oba voda. Time hidraulički sustav postaje krut i osjetljiv na

vanjsko preopterećenje. Sustav se od preopterećenja mora zaštititi ugradnjom ventila za ograničenje tlaka između blokirajućih ventila i cilindra. Na slici je prikazano rješenje sa samo jednim ventilom za ograničenje tlaka koji djeluje u oba smjera pomoću Graetzovog spoja. Sustav se može zaštititi i uobičajenim načinom ugradnje pri kojem se u svaki vod cilindra paralelno spaja po jedan ventil za ograničenje tlaka (izlaz ventila spaja se na spremnik).

14.4 Sinkronizacija gibanja izvršnih elemenata

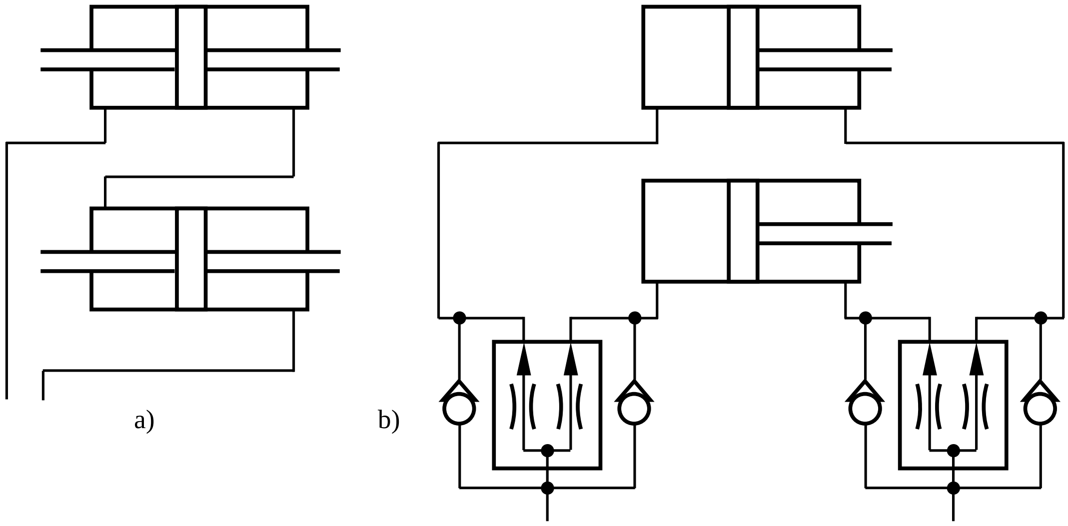
Sinkronizacija gibanja izvršnih elemenata predstavlja relativno složen problem. Najveća točnost postiže se korištenjem proporcionalnih ventila i elektro-hidrauličkih sustava. Sinkronizacija se može izvesti *mehanički i hidraulički*. Najjednostavniji način mehaničke sinkronizacije (*Sl. 14.13*) ostvaruje se mehaničkim – krutim povezivanjem više klipnjača hidrauličkih cilindara. Time se osigurava točna sinkronizacija, ali nesimetrično opterećenje može izazvati probleme.



Sl. 14.13 Mehanička sinkronizacija

Hidraulička sinkronizacija može se izvesti na više načina. Najjednostavniji način je serijsko povezivanje više cilindara (*Sl. 14.14* a). Protok u svim vodovima mora biti međusobno jednak. Zato se serijsko povezivanja primjenjuje isključivo za simetrične motore (koji u oba smjera imaju isti radni volumen, npr. cilindri s prolaznom klipnjačom). Gubici istjecanja i promjena stlačivosti fluida dovode do gubitka sinkronizacije, zato je potrebno ugraditi sklop kojim se nadzire i automatski korigira kretanje cilindara, tako da se prema potrebi fluid dodaje u spojnu cijev (između cilindara) ili oduzima iz nje.

Paralelno povezivanje cilindara može se izvesti korištenjem regulatora protoka. Ispred svakog priključka svakog cilindra potrebno je ugraditi regulator protoka pražnjenja cilindra i paralelno s njime nepovratni ventil koji dozvoljava strujanje u suprotnom smjeru (za punjenje cilindra). Jednostavnije se isti rezultat postiže ugradnjom ventila za raspodjelu protoka (*Sl. 14.14* b). Zbog gubitaka istjecanja i promjenljive stlačivosti fluida i u paralelnom spoju dolazi do pogreške sinkronizacije koja se s vremenom povećava. Zato je i ovdje potrebna regulacija sinkroniziranog hoda. Mjere se međusobna odstupanja hoda sinkroniziranih motora, pa se ta odstupanja poništavaju pomoću odgovarajućih ventila i/ili pumpi.



Sl. 14.14 Hidraulička sinkronizacija a) serijski spoj b) paralelni spoj cilindara

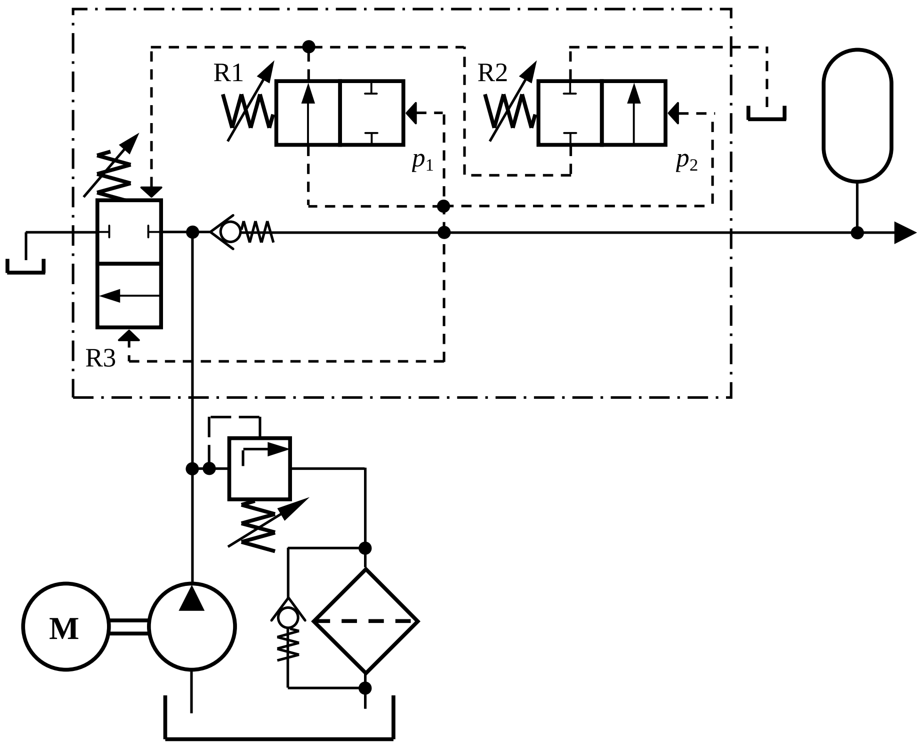
14.5 Sklopovi s hidrauličkim akumulatorom

Karakteristična je ugradnja hidrauličkog akumulatora paralelno s pumpom (*Sl. 1.1*). Takav sklop pumpa-akumulator često se koristi za pogon većeg broja hidrauličkih motora. U trenucima maksimalne potrošnje, u takvom spoju akumulator može pokriti razliku potrebnog protoka i kapaciteta pumpe (vršna opterećenja). Time se dobiva mogućnost ugradnje slabije pumpe (kapaciteta manjeg od maksimalne moguće potrošnje).

Sl. 14.15 prikazuje sklop za punjenje hidrauličkog akumulatora [16] koji se sastoji od pumpe konstantnog protoka, akumulatora i ventila za punjenje akumulatora (prikazan pravokutnikom crta-točka). Sklop se primjenjuje u situacijama u kojima je potreban približno konstantan tlak napajanja, a prisutne su relativno velike oscilacije potrebnog protoka hidrauličkog fluida. Ventil za punjenje zapravo je dvopoložajni (on/off) regulator, tako da tlak neprekidno oscilira između minimalne p_1 i maksimalne namještene vrijednosti p_2.

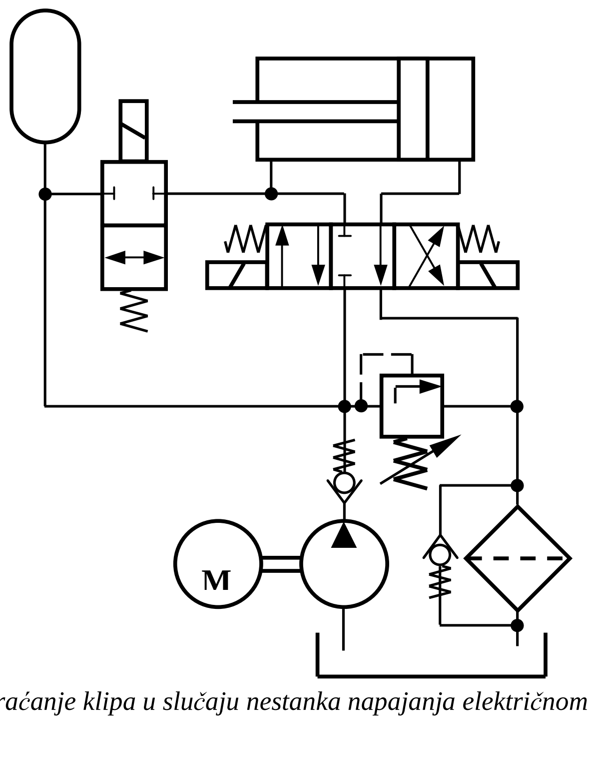
Kad tlak sustava padne ispod minimalne namještene vrijednosti ($p<p_1$), otvara se razvodnik R1, a razvodnik R2 je zatvoren. Na oba priključka za aktivaciju razvodnika R3 tada djeluje isti tlak, pa se taj razvodnik zatvara pod djelovanjem opruge. Započinje faza punjenja akumulatora. Porastom tlaka zatvara se ventil R1, ali pri tome R3 ostaje zatvoren i punjenje akumulatora se nastavlja sve dok se ne postigne maksimalni namješteni tlak ($p=p_2$). Tada se otvara razvodnik R2 što dovodi do rasterećenja gornjeg priključka za aktivaciju razvodnika R3. Taj razvodnik se zato otvara i spaja izlaz pumpe sa spremnikom. U toj fazi pumpa radi praktički bez opterećenja (prazan hod), a nepovratni ventil onemogućava pražnjenje akumulatora prema spremniku. Međutim, akumulator se u toj fazi prazni zbog napajanja potrošača (normalna potrošnja). Tlak u sustavu se zato smanjuje, pa se zatvara razvodnik R2, ali razvodnik R3 i dalje ostaje otvoren onemogućavajući punjenje akumulatora sve dok se ne dosegne minimalni tlak p_1 i ponovo otvori razvodnik R1.

Bez ventila za punjenje može se dvopoložajnu regulaciju izvesti uzastopnim uključivanjem i isključivanjem elektromotora pumpe. Također i u tom slučaju, između pumpe i akumulatora ugrađuje se nepovratni ventil. Ovakva ugradnja nepovratnog ventila pogodna je npr. za stezni uređaj. Akumulator održava tlak potreban za održavanje izratka u stegnutom stanju, a pumpa je za to vrijeme rasterećena pa troši samo snagu praznog hoda.



Sl. 14.15 Sklop za punjenje hidrauličkog akumulatora

Hidraulički akumulator može obaviti nužne radne operacije u slučaju nestanka napajanja električnom energijom [8] (*Sl. 14.16*).Pri nestanku električnog napajanja prikazani 2/2 razvodnik se uključuje, pa se klipnjača uvlači na račun fluida i energije pohranjenih u akumulatoru. Pri tome je uz prikazanu vezu desnih priključaka glavnog 4/3 razvodnika u neutralnom položaju potrebno da u tom neutralnom položaju razvodnika klipnjača ne bude opterećena znatnijom silom udesno.

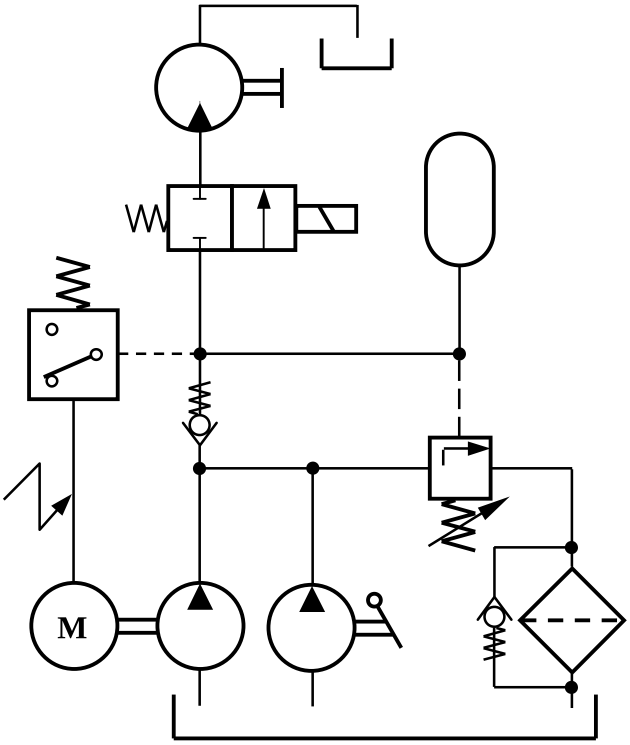


Sl. 14.16 Vraćanje klipa u slučaju nestanka napajanja električnom energijom

15 PRIMJERI PRIMJENE

15.1 Sklop za pokretanje diesel-motora

Veliki diesel-motori pokreću se hidrauličkim pokretačima zbog potrebnih velikih sila (*Sl. 1.1*) [5]. Kad se dosegne potrebni tlak (završeno punjenje hidrauličkog akumulatora) tlačni prekidač isključuje motor koji pokreće pumpu. Tlačni prekidač ima dva dijela, hidraulički (klip s oprugom koja popusti kad na čelo klipa djeluje tlak veći od namještenog) i električki (sklopka koju pokreće taj klip). Za slučaj neispravnosti agregata pumpe ili električkog napajanja, predviđena je pomoćna ručna pumpa za punjenje akumulatora.



Sl. 15.1 Hidraulički sklop za pokretanje diesel-motora

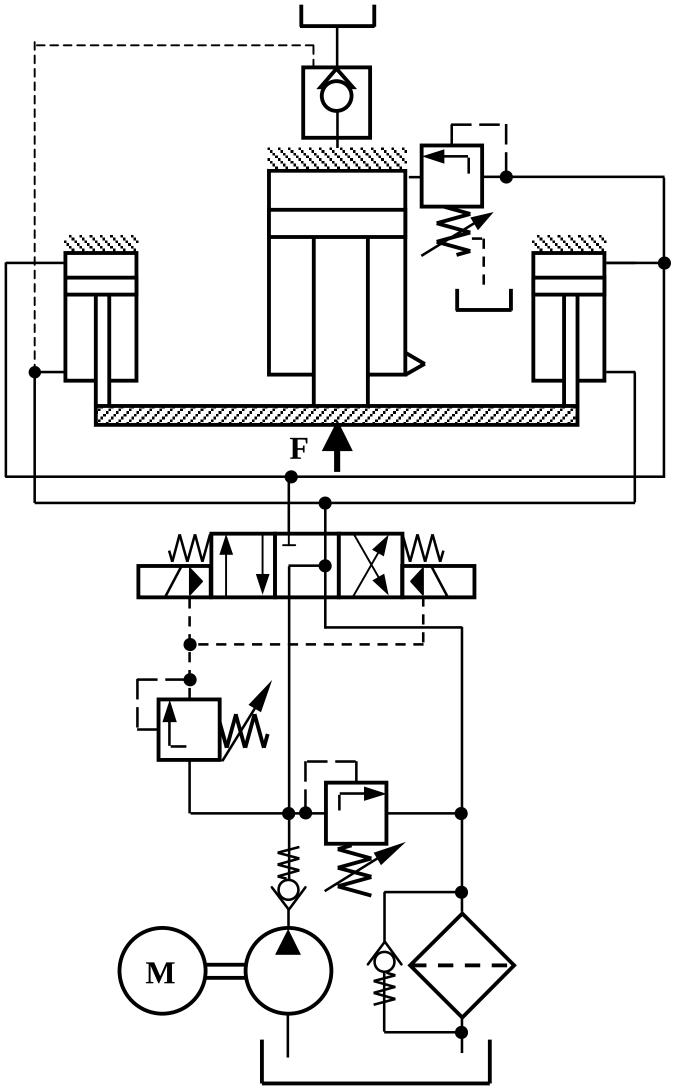
15.2 Hidraulička preša

Kod preša su općenito potrebne velike sile pritiska, a shodno tome i pogonski cilindri velikog promjera [15]. Pri brzom kretanju takvih cilindara javljaju se veliki protoci. Ako se takvo kretanje ostvaruje snagom pumpe, potrebne su i pumpe velikog kapaciteta.

Zato se brzi hod preše obavlja pomoću dodatnih manjih cilindara brzog hoda, a za punjenje glavnog cilindra se za to vrijeme koriste nepovratni ventili s hidrauličkim deblokiranjem, tzv. ventili za punjenje (*Sl. 15.2*).Glavni cilindar puni se samo s jedne strane, dok je druga povezana s atmosferskim zrakom (jednoradni cilindar).

Početno brzo kretanje preše prema dolje vrši se pomoću dva manja cilindra za brzi hod. Fluid se pri tome dovodi u oba mala cilindra, dok fluid u glavni cilindar dotiče putem ventila za punjenje iz zasebnog spremnika za punjenje smještenog iznad glavnog ventila. Kad alat preše nalegne na izradak, povećava se opterećenje preše (sila F), pa tlak fluida u sustavu raste. Tada se otvara tlačni uključni ventil, pa sva tri cilindra dolaze pod puni tlak. Daljnje kretanje prema dolje vrši se pomoću sva tri cilindra. Povratno kretanje preše obavlja se u potpunosti pomoću cilindara brzog

hoda. Pod utjecajem tlaka fluida deblokira se ventil za punjenje, pa pri kretanju prema gore klip glavnog cilindra samo potiskuje radni fluid natrag u spremnik za punjenje, što za cilindre brzog hoda predstavlja dodatno opterećenje.

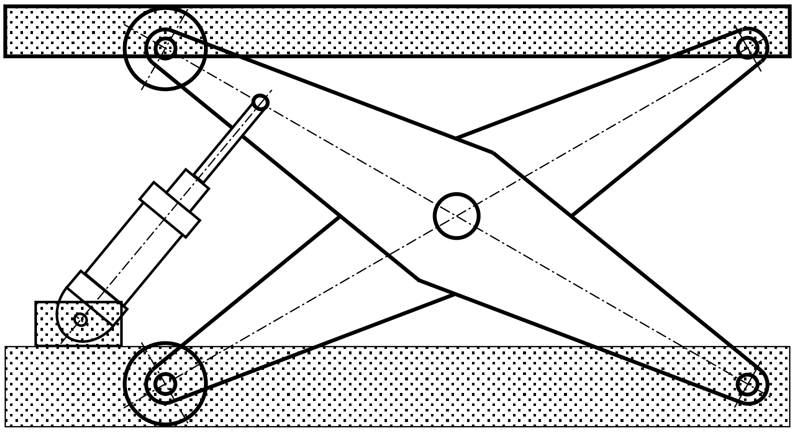


Sl. 15.2 Hidraulička preša

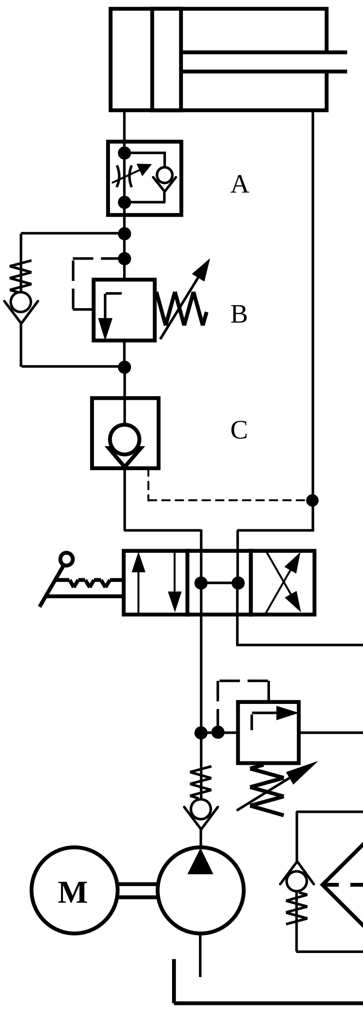
15.3 Platforma za podizanje

Platforma (*Sl. 15.3*) se podiže pomoću hidrauličkog cilindra [8]. U neutralnom položaju platforma treba ostati duže vrijeme nepomična u bilo kojoj poziciji.

Nepomični položaj osigurava se deblokirajućim nepovratnim ventilom u funkciji blokirajućeg ventila (*Sl. 15.4*).Uključni ventil osigurava protu-držanje.



Sl. 15.3 Skica platforme za podizanje



Sl. 15.4 Hidraulička shema platforme za podizanje

LITERATURA

1. Petrić, J.: zapis predavanja kolegija Hidraulika i pneumatika FSB Zagreb, 1998.
2. Murrenhoff, H.: Grundlagen der Fluidtechnik Teil 2, Shaker Verlag, Aachen, 2006.
3. Nikolić, G.: Pneumatika, Školske novine, Zagreb, 2002.
4. Bishop, R.H.: The Mechatronics Handbook, CRC Press, Boca Raton 2002.
5. Koroman, V., Mirković, R.: Hidraulika i pneumatika, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
6. Krivts, I.L.: Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment, CRC Press, Boca Raton 2006.
7. Nikolić, G.: Pneumatsko upravljanje, Sveučilišna naklada, Zagreb, 1990.
8. Nikolić, G.: Hidraulika, Školske novine, Zagreb, 2003.
9. Savić, V.: Uljna hidraulika, Dom štampe, Zenica, 1988.
10. Ciner, P.: Hidraulički uređaji, TŠC, Zagreb, 1980.
11. Fancev, M., Franjić, K.: Pumpe, Tehnička enciklopedija, sv.XI, Leksikografski zavod, Zagreb, 1988.
12. Dubbel, H.: Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, Berlin, 1981.
13. Башта, Т. М.: Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем, Машиностроение, Москва, 1974.
14. Ulmer, D.: Priručnik za hidrauliku, OMO, Beograd, 1975.
15. Schmitt, A.: Hidraulik trener 1. Dio, G. L. Rexroth GmbH, Lohr am Main, 1981.
16. Murrenhoff, H.: Grundlagen der Fluidtechnik Teil 1, Shaker Verlag, Aachen, 2005.